OBSERVACIONES SOBRE LA PREDICCIÓN DE SISMOS: UNA VISIÓN ACTUAL[1]

Edgar Tapia-Hernández[2]

Resumen: El presente artículo estudia la factibilidad de efectuar predicciones de sismos, así como el estado actual de los estudios relacionados con sustento científico. El artículo centra su atención en métodos basados en precursores físicos que consideran observaciones directas, métodos basados en patrones estadísticos, catálogos históricos para establecer los requisitos mínimos que deben considerarse para identificar métodos objetivos para la predicción de sismos. El artículo discute distribuciones de probabilidad para sismos en México a partir de registros históricos.

Palabras clave: parámetros geofísicos, parámetros estadísticos, precursores, predicción, sismos.

OBSERVATIONS FOR EARTHQUAKE PREDICTIONS: A CURRENT VIEW

Abstract. This paper studies the feasibility to make seismic predictions and the state of the science of the related science-based studies. This research, focus its attention in methods based on physical precursors with direct observations, methods based on statistical patterns, historical catalogs and establishes the minimum requirements to be considered in order to identify objectively methods of earthquake prediction. The paper discusses the probability distributions for earthquakes in Mexico from historical records.

Keywords: earthquakes, geophysical parameters, precursors, predictions, statistics patterns.

INTRODUCCIÓN

El 20 de marzo del 2012 se presentó un sismo con una magnitud 7.4 con epicentro en las cercanías de Ometpec, Guerrero y Pinotepa Nacional, Oaxaca en la costa sur de México (16.42 latitud N y -98.36 longitud W) y fue percibido en gran parte del país. Pese a su magnitud, no hubo daños de importancia en las estructuras de las principales ciudades, por lo que el evento hubiera perdido relevancia en los medios de comunicación, si no se hubieran presentado una serie de réplicas, que a la opinión pública le parecían inusuales. La mayor de ellas ocurrió el 2 de abril con una magnitud de 6.0 grados que se sumó a las 286 réplicas que se habían presentado en menos de dos semanas con magnitudes que iban desde los 3.9 a los 6.0 grados en la escala de Richter. Sin embargo, esto no llamó la atención de la comunidad científica, puesto que es viable que se presenten esa cantidad de réplicas en sismos fuertes y a que se han desarrollado algoritmos para determinar la cantidad y magnitud de las réplicas posteriores a un terremoto como Reasenberg y Jones (1994).

Adicionalmente, por esos días se presentaron coincidentemente sismos de magnitud relevante alrededor del mundo (USGS, 2013): el 14 de marzo en Honshu, Japón de 6.9 grados; el 21 de marzo en Nueva Guinea de 6.6 grados; el 25 de marzo en Maule, Chile de 7.1 grados; el 11 de abril en Sumatra de 8.6 y 5.5 grados; en Michoacán, México de 6.5 grados; el 12 de abril en el Golfo de California de 6.9 grados, por mencionar algunos.

Este panorama, alentó y supuestamente confirmó la utilidad de métodos de predicción de sismos con un sustento empírico sin comprobación previa ni demostración científica basados en la posición de los planetas,

[1]Artículo recibido el 12 de abril del 2013 y aceptado para publicación el 19 de octubre de 2013.

[2]Profesor Titular, Universidad Autónoma Metropolitana – Azcapotzalco, Av. San Pablo, 180, México, D.F. E-mail: etapiah@azc.uam.mx

presentimientos, cambio climático, fuerzas exteriores al planeta provenientes del sistema solar, sueños, periodicidad supuestamente identificada previamente por la cultura Maya (a propósito del supuesto fin del mundo el 21 de diciembre de ese mismo año), entre otras.

La realidad es que pese a la insostenibilidad técnica de estas teorías, la incertidumbre relacionada con los sismos alimenta el interés público a través de medios formales e informales de comunicación, de manera que logran posicionarse y hasta presentarse en eventos técnicos especializados. Por ejemplo, Curiel (2010) que sugiere "una temporada de terremotos" entre los meses de octubre a diciembre basada en fuerzas gravitatorias provenientes del exterior del planeta, sin que esta teoría tenga algún sustento científico o alguna tendencia de consideración.

En la contraparte, varios países a través de las universidades y agencias gubernamentales han desarrollado investigaciones con sustento científico basadas en observaciones de precursores geoquímicos e hidrológicos como programas para la predicción de sismos durante las últimas décadas. Por ejemplo, en 1980 se formó el Consejo Nacional para la Evaluación de la Predicción Sísmica ("National Earthquake Prediction Evaluation Council*"*) de Estados Unidos, que asesora al Director del Instituto Geológico sobre los métodos de predicción sísmica y la investigación científica relacionada con ellos. De manera que alrededor del mundo se han logrado acumular registros confiables de varios tipos de observaciones en agua y gases en la superficie y estratos subterráneos que podrían ser usados como indicadores de los sismos y su proceso de generación.

Un método de predicción de sismos con sustento científico debe definir al menos los siguientes aspectos:

a. El tiempo de la ocurrencia del evento; esto se podría realizar a partir un intervalo de tiempo definido con una tasa de probabilidad.
b. El sitio de la ocurrencia, incluyendo la posición geográfica definida en coordenadas y la profundidad.
c. La magnitud del sismo pronosticado.
d. Definición y justificación científica del método empleado.
e. Definición de la incertidumbre o una referencia del error esperado en la predicción.

El presente artículo pretende difundir la información disponible y representa un compilado de resultados de investigaciones e información estadística con sustento científico para la predicción de los sismos. Centra su atención en los esfuerzos que pretenden identificar terremotos para advertir a la población y reducir las posibles pérdidas. Los métodos presentados en este artículo se han clasificado dos categorías: a) métodos basados en precursores físicos que consideran observaciones directas y b) métodos basados en patrones estadísticos y catálogos históricos.

Asimismo, en este documento se presentan consideraciones que autoridades gubernamentales, el gremio de la ingeniería especializado en desastres naturales, medios de comunicación y el público en general debe tener en cuenta para identificar esfuerzos serios para la predicción y/o prevención de los daños asociados a movimientos sísmicos.

PRECURSORES FÍSICOS BASADOS EN OBSERVACIONES DIRECTAS

Observaciones geoquímicas

El 15 de noviembre de 1994 se presentó un temblor de magnitud 7.1 en la escala de Ritchter entre la isla de Luzón y Mindoro en Las Filipinas a 48 kilómetros al sur del volcán Taal, donde coincidentemente se había estado llevando a cabo una investigación sobre la emisión de gases del cráter (entre junio de 1993 hasta noviembre de 1996). El estudio, a cargo del profesor Patrick Richon del Departamento del Monitoreo del Medio Ambiente de Francia y otros colaboradores de Institutos y Universidades francesas, reportó un incremento inusual en las mediciones de un gas llamado Radón registrado veintidós días antes del sismo. Inicialmente, el incremento (hasta en una relación de seis veces) se relacionó al Tifón *Teresa*que se presentó días antes de la medición (21 al 23 de octubre de 1994). Sin embargo, los resultados del monitoreo durante el Tifón *Angela* (2 al 5 de noviembre de 1995)con una trayectoria significativamente similar, pero con una intensidad mucho mayor, desestimaron esta teoría puesto que los registros del gas no indicaron ningún disturbio.

Mediciones de gas Radón

El Radón es el gas terrestre más estudiado como precursor de un evento sísmico y se trata del único gas noble radioactivo que existe en la naturaleza (incoloro, inodoro e insípido que en su forma sólida es de color rojizo). Existen tres isótopos del gas Radón: ^{222}Rn ($T_{1/2}$ = 3.825 días), ^{220}Rn ($T_{1/2}$ = 54.5 seg) y ^{219}Rn ($T_{1/2}$ = 3.92 seg), de los cuales el más estudiado es el ^{222}Rn debido a su mayor tiempo de vida y mayor interés geoquímico. El isótopo ^{222}Rn pertenece a las series de decaimiento del isótopo de Uranio ^{238}U, que emite rayos 3α, rayos 2β y varios rayos γ durante su desintegración en una condición de equilibrio. Así que el monitoreo para el estudio de técnicas para la predicción de sismos se realiza midiendo los rayos α y/o rayos γ.

Los resultados obtenidos por el Prof. Richon y sus colaboradores se publicaron en revistas especializadas (Richon et al*.,* 2003). En consecuencia, los científicos de la época tuvieron una congruente sospecha de que la anomalía en el gas Radón (principalmente el isótopo 222), concentrado en pozos de agua y en gases del suelo, podía estar asociada al aumento de esfuerzos de las placas tectónicas de la región lo que provocó finalmente el sismo de Mindoro en 1994.

Aunado a lo anterior, otros estudios habían identificado previamente variaciones geoquímicas antes de un sismo, como Hirotaka et al*.* (1988) con mediciones del mismo gas Radón a 65 kilómetros del epicentro del sismo de Nagano en Japón de magnitud de 6.8 grados (Richon et al*.,* 2003). Otro ejemplo es el incremento en la concentración de Radón en mediciones del agua subterránea desde octubre de 1994 en la prefectura Hyogo, cuya magnitud máxima (diez veces más grande que la lectura inicial) se presentó el 8 de enero; esto es, nueve días antes del famoso sismo de Kobe en Japón del 17 de enero de 1995 de 7.3 grados de magnitud (Igarashi et al*.,*1995). Más recientemente, se identificó el registro de altas concentraciones de gases, principalmente Radón (^{222}Rn), Helio (He) y Dihidrógeno (H_2) cerca del epicentro del sismo de Wenchuan en China, que ocurrió el 12 de mayo del 2008 de magnitud de 8.0 grados (Zhou et al., 2010; Zheng et al*.,* 2012).

Además, Wakita et al*.* en 1991 identificaron una anomalía en las mediciones del gas Radón como un decremento (en lugar de un incremento como los otros estudios) que inició dos días antes del sismo de Japón de 1990 de magnitud de 6.0 grados (Igarashi y Wakita, 1995) cuyas mediciones se replican en la Figura 1.

Desde mediados de los sesentas se desarrolló la teoría de que el mundo está conformado por placas tectónicas que tienen desplazamientos relativos entre sí y que el deslizamiento entre esas placas libera energía por fricción que produce los sismos (Figura 2). La hipótesis de que la emisión del gas Radón ^{222}Rn está relacionada con un evento sísmico es simple: la compresión cercana a una falla cuyo movimiento es inminente produce emisiones de Radón ^{222}Rn, como si el suelo fuera exprimido y por lo tanto una mayor emisión del gas anticiparía el terremoto.

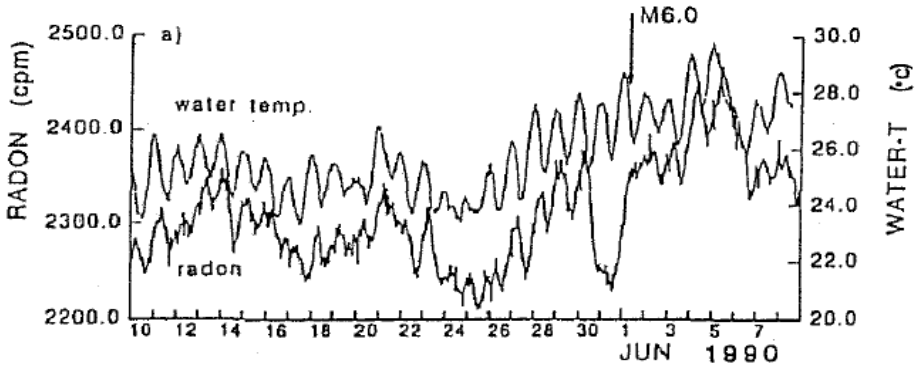

Figura 1: Comportamiento del gas Radón y temperatura del agua previo al sismo de Japón en 1987(adaptada de Igarashi y Wakita, 1995).

De hecho experimentalmente, Kato et al*.* en 1989 lograron establecer una correlación entre el incremento de la emanación del gas Radón ^{222}Rn ante un incremento de esfuerzos en experimentos de laboratorio en ejemplares de roca ensayados en compresión uniaxial (Igarashi y Wakita, 1995).

Figura 2: Placas tectónicas (adaptada de *www.almez.pntic.mec.es*).

Entonces, los científicos se han dedicado a medir las emisiones del gas Radón ^{222}Rn en todos los sitios posibles (como Segovia et al*.,* 1999; Omori et al*.,* 2007; Richon et al*.,* 2010). En Japón se han monitoreado sistemáticamente las mediciones de los gases como método para predecir los sismos desde 1973, mediante dos redes de trabajo establecidas por la Universidad de Tokio y el Servicio Geológico de Japón. De manera que para 1995 ya se contaban con 14 estaciones dedicadas a la observación de agua subterránea localizadas en el Océano Pacífico con asesoría de la Universidad de Nagoya, la Universidad de Tokio y la Universidad de Kyoto (Igarashi y Wakita, 1995).

Sin embargo, los resultados no han sido definitivos: con el paso del tiempo la teoría no ha sido comprobada, ya que los sismos se siguen presentando sin que se detecten las emisiones atípicas de gas en todos los casos (Richon et al*.,* 2010). También se han reportado anomalías de la concentración de Radón ^{222}Rn que no son seguidas por sismos (Peña, 2003). Como ejemplo de lo anterior, en la Figura 3 se muestran los resultados de mediciones realizadas entre enero a mayo de 1987 en la Prefectura de Fukushima al noreste de Japón, donde se presentaron cuatro sismos de mediana intensidad a una distancia al epicentro que está igualmente incluida en la figura. Como se aprecia, la variación en las mediciones no tiene una clara correlación que sirva de alerta de una actividad sísmica, aunque sí se notan decrementos después de cada evento.

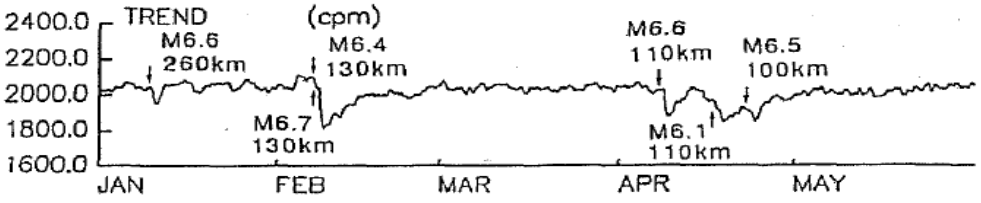

Figura 3: Registro de la concentración del Gas Radón de enero a mayo de 1987 en la Prefectura de Fukushima (adaptada de Igarashi y Wakita, 1995).

Asimismo, se han realizado predicciones basadas supuestamente en variaciones de la concentración del gas Radón con sitios, fecha y magnitudes equivocadas y que, posterior a algún evento se pretenden justificar. Este es el caso de la predicción realizada por el técnico Giampaolo Giuliani previo al sismo de l'Aquila, Italia de abril de 2009 y que ahora es ampliamente reconocido en internet como un supuesto previsor de sismos.

Del mismo modo, algunas instituciones como el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés) han publicado modelos en términos probabilísticos para el pronóstico de sismos (por ejemplo después de un sismo fuerte) basados en modelos estocásticos que son adecuadamente comprendidos por los científicos, pero que crean confusión en el público en general (Reasenberg y Jones, 1994).

A partir de investigaciones cualitativas que consideran las mediciones de 150 estudios se ha hecho notar que las mediciones de gases no son representativas de las concentraciones químicas del subsuelo a grandes profundidades, sino que las aguas termo-minerales han estado en contacto con grandes volúmenes de rocas de la corteza a varias profundidades de modo que las mediciones son más representativas del entorno local del suelo y no del epicentro (Toutain y Baubron, 1999; Peña, 2003), ya que el deslizamiento de placas tectónicas que provoca un sismo se presenta a varios kilómetros de profundidad. De manera que antes de considerar la medición de la variación de los gases como muestras para la identificación de precursores de terremotos, es necesario examinar su relación con perturbaciones ambientales como presión atmosférica, marea, temperatura ambiental, lluvia, presión barométrica, humedad del suelo o de la tierra, temperatura del viento, perturbaciones volcánicas (Segovia et al., 1999), etc. Esto ha demostrado la necesidad de una medición simultánea de parámetros externos durante la monitorización de los gases y la creación de redes de estaciones.

Wakita et al. en 1986 demostraron que los patrones de variación del Radón ^{222}Rn en aguas subterráneas varían significativamente de sitio a sitio y que las concentraciones del gas y la intensidad de los rayos γ en el aire muestran concentraciones muy variables y dependientes de la precipitación y cambios barométricos de presión. De hecho Yamauchi y Shimo en 1982 detectaron variaciones temporales de concentración de gas Radón ^{222}Rn en observatorios de movimiento de la corteza y encontraron que la mayor parte de las variaciones eran causadas por la precipitación y que podían ser razonablemente bien simuladas en un modelo de tanque (Igarashi y Wakita, 1995).

Mediciones de otros gases

En lo que respecta a la variación de otros gases, se han detectado anomalías en la concentración de Helio medidas como proporción de Argón (He/Ar) entre 1 a 3 meses antes del sismo del 14 de septiembre en 1984 al oeste de Nagano, Japón de magnitud de 6.8 grados. Las anomalías se detectaron en fumarolas de gas y en tres fuentes minerales en varios sitios con distancias al epicentro entre 9 a 95 kilómetros (Nagamine y Sugisaki, 1991).

Debido a que el proceso de generación de Hidrógeno en la corteza es complicado, es posible que el Hidrógeno pudiera funcionar eficientemente como indicador de la actividad de las fallas tectónicas. Kato et al. en 1989 demostraron experimentalmente en muestras de granito bajo carga uniaxial que la fractura de roca está relacionada con la emanación de Hidrógeno H_2. Esto fue confirmado por Stake et al. en 1985 que reportaron una emisión anómala de Hidrógeno H_2 en cinco estaciones de medición antes del sismo del 26 de mayo de 1983 de magnitud 7.7 grados en las fallas de Atotsugawa y Ushikubi, Japón y la emisión de Hidrógeno H_2 en burbujas en manantiales minerales un mes antes del sismo de Nagano el 14 de septiembre de 1984 de magnitud 6.8 (Igarishi y Wakita, 1995).

También se ha medido la concentración de Carbono C^- en manantiales minerales para la predicción de eventos sísmicos. Por ejemplo, Kaoizumi et al. en 1985 detectaron anomalías en la composición química (principalmente CI) a lo largo de las falla de Yoshioka en Japón (Peña, 2003).

Observaciones geofísicas

Otras investigaciones científicas basadas en estudios cuantitativos físicos como la reflexión y refracción de ondas mecánicas, velocidad de las ondas sísmicas y métodos basados en campos electromagnéticos, magnéticos o eléctricos y fenómenos radiactivos entre otros, también se han utilizado para el mismo fin.

Por ejemplo, Derr en 1973 y Kamagowa et al. en 2005 registraron luminosidades relacionadas con un terremoto; Gokhberg et al. en 1982 y Nagao et al. en 2002 detectaron radiaciones electromagnéticas; Kondo en 1986 y Vershinin et al. en 1999 reportaron cambios en el campo eléctrico atmosférico; Malchanov y Hayakawa en 1998 y Liu et al. en 2000 registraron perturbaciones ionósferas (Omori et al., 2007).

Roeloffs (1988) identificó precursores hidrológicos relacionados con la presión barométrica, lluvia y extracción de agua, particularmente antes del sismo de Tangshan en China de 1976 y el sismo de Izu-Oshima-Kinkai en Japón de 1978.

Tsunagai y Wakita en 1995 y Sugisaki et al. en 1996 reportaron cambios en la composición química de manantiales y pozos. Melchiorre y Criss en 1999 registraron descargas de agua tibia, un alto contenido de sólidos totales y otros cambios químicos en manantiales de la parte central de California, Estados Unidos (Peña, 2003).

En Turquía se estudió la composición de aguas termales a lo largo de 800 km de la falla de Anatolia durante tres años (2002 a 2004) para investigar alguna relación posible entre la actividad sísmica y las variaciones temporales en las características químicas e isótopos del agua. Aunque durante las mediciones no se presentaron sismos de magnitudes importantes, se observó una correlación entre las variaciones químicas y composiciones de los isótopos en algunos pozos con actividad sísmica de moderada magnitud (entre 3 y 5 grados) con epicentros cercanos a los sitios de los muestreos (Süer et al*.,* 2008).

Más recientemente, algunas horas antes del catastrófico terremoto del 26 de diciembre del 2004 en Sumatra, Indonesia, de magnitud 9.1, se detectaron perturbaciones en la región F de la ionósfera (foF2 y hmF2) medidas desde Delhi, India, mediante una sonda digital a distancia (Dutta et al*.,* 2007).

Guo y Bin (2008) reportaron nubes inusuales 69 días antes del sismo de febrero de 2005 de 6 grados de magnitud en Zarand en Irán. Las espesas nubes extendidas a lo largo de la falla de Irán y temperaturas altas fueron determinadas a través de datos de sensores satelitales geoestacionarios. El estudio propone que las nubes pudieron ser modificadas por una emisión atípica de gases de la litósfera.

Igualmente, se han presentado teorías sobre la base de mediciones satelitales y/o redes de GPS (sistemas de posicionamiento global). Por ejemplo, la predicción de sismos mediante el movimiento de placas tectónicas como Gallo (2010) que presenta un seguimiento de las placas a través de *Google Earth*, sin que en ningún caso se haya conseguido aún algún resultado definitivo.

PRECURSORES BASADOS EN PATRONES ESTADÍSTICOS

Aunado a los métodos para predecir sismos basados en un evento atípico, existen algunas otras metodologías basadas en correlaciones estadísticas, a partir de catálogos históricos de los sismos o métodos desarrollados a partir de modelos probabilísticos matemáticos que parten de:

a. Disminución de la actividad sísmica en una región geográfica (brecha sísmica).
b. Tendencia de movimiento de los epicentros, que usualmente se presentan dispersos, hacia una región geográfica específica.
c. Aumento de la sismicidad en la periferia de una región geográfica (patrón de dona).
d. Incremento de la sismicidad a nivel local en eventos de baja magnitud.

De acuerdo a la teoría del rebote elástico, el proceso de generación de un sismo consiste en un periodo de acumulación de energía de deformación por el movimiento de las placas tectónicas y una liberación repentina que provoca el terremoto. Esa liberación de energía es precedida por un nuevo periodo de acumulación de energía hasta que se sobrepase la resistencia de las placas dando lugar a un nuevo sismo y así sucesivamente. Con ese fundamento, se han identificado áreas de contacto entre las placas que no han presentado actividad sísmica en un periodo de tiempo y que se conocen como brechas sísmicas.

Brechas sísmicas

Un ejemplo de lo anterior es la predicción de un sismo intenso a partir de la regularidad histórica que tendría epicentro en el sur de México en una zona conocida como la brecha sísmica de Guerrero (Figura 4). Esta zona se ubica en el Océano Pacífico en el área de subducción de la Placa de Cocos (Figura 2) frente al Estado de Guerrero, desde el sur de Acapulco hasta Papanoa indicado en la Figura 4 como *Guerrero Lap*.

Es decir, la comunidad científica ha identificado una alta probabilidad de que se presente uno o dos sismos de intensidad mayor a 8 grados, a partir del momento sísmico acumulativo en la brecha de Guerrero en la que no se han detectado sismos supuestamente desde 1911.

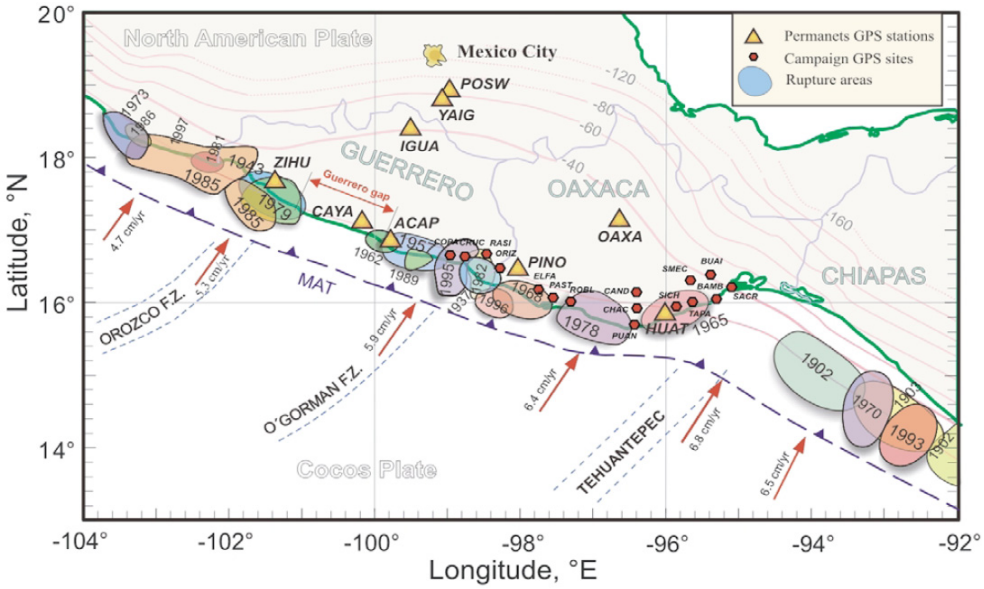

Figura 4: Localización de la brecha sísmica de Guerrero (adaptada de Franco et al., 2005).

Se ha estimado que la brecha de Guerrero tiene unos 230 km de extensión máxima con un ancho de falla cercano a 80 km. Por esta razón, usando la relación empírica entre la magnitud del sismo M_s y el área de ruptura A en kilómetros cuadrados propuesta por Singh et al. en 1980 (ecuación 1), el sismo tendría una magnitud máxima esperada de 8.3 grados en la escala de Richter (Singh y Ordaz, 1994).

$$M_s = 0.887 \log A + 4.532 \quad (1)$$

Esta predicción es válida puesto que ya antes se han identificado brechas sísmicas que han estado correctamente relacionadas con sismos importantes. Por ejemplo, el terremoto del 19 de septiembre de 1985 que afectó significativamente la Ciudad de México, junto con los eventos del 21 de septiembre, del 25 de octubre y sus decenas de réplicas disiparon lo que se conocía como la brecha de Michoacán; otros ejemplos son Colima en 1973 y Ometepec en 1982 en México.

A partir del catálogo de sismos históricos, algunos investigadores han modelado estos procesos de ocurrencia de los sismos recurriendo a modelos simplificados del proceso físico y modelos basados en la estadística bayesiana que hacen uso óptimo de la información disponible (Singh y Ordaz, 1994). Sin embargo, los años han pasado y el supuesto sismo predicho (desde antes de 1990) aún no se ha presentado. Las explicaciones proponen que: a) la energía se sigue acumulando y que tarde o temprano se va a liberar (aunque esto tampoco debería implicar que ocurrirá en un único sismo de gran magnitud); y b) otra teoría es que la liberación de la energía (el movimiento de las placas) se realizó mediante un terremoto silencioso.

La teoría del terremoto silencioso se fundamenta en la liberación de la energía que provocaría un sismo, a través del desplazamiento de las placas durante varios días, que se han detectado a través del monitoreo de algunos sitios mediante estaciones de sistema de posicionamiento global (GPS).

Un supuesto sismo silencioso se explica en la Figura 5, donde se muestra la localización de estaciones del sistema de posicionamiento global (GPS) en suroeste de British Columbia, Canadá. Lo usual es que la posición de esas estaciones localizadas sobre la Placa de Norteamérica tiendan a moverse en dirección noroeste (flechas negras) en un promedio de 8 mm por año (Dragert et al., 2001), debido al movimiento de subducción entre la placa Juan de Fuca y la placa Norteamericana (Figura 2). Sin embargo, en agosto de 1999, se presentó un desplazamiento de 4 mm en dirección suroeste (flechas rojas); esto es, las siete estaciones mostradas en la figura tuvieron un desplazamiento

contrario al esperado que se desarrolló entre 6 y 15 días. Esto significa que durante ese periodo de tiempo se realizó una liberación de la energía equivalente a una magnitud de un sismo de 6.7 grados, pero sin que se registrara un sismo propiamente.

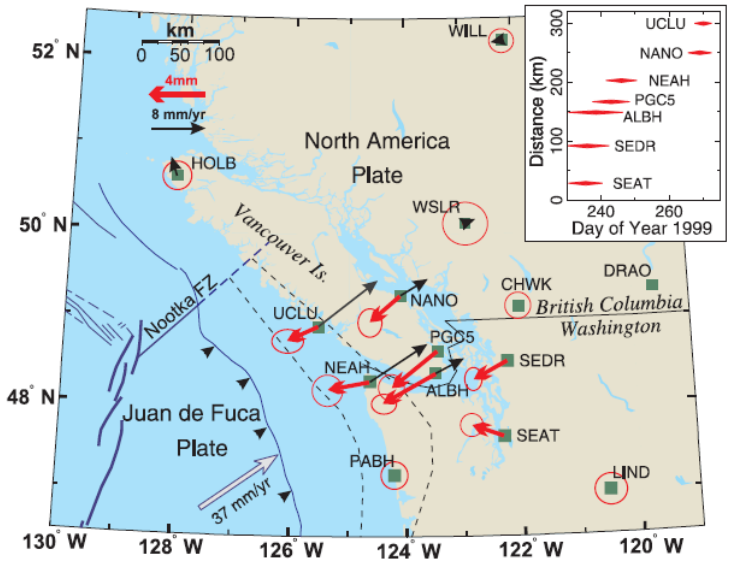

Figura 5: Descripción del movimiento de las estaciones del sistema posicionamiento global (adaptada de Dragert et al., 2001).

Probabilidad de ocurrencia

En la contraparte y a favor de los precursores basados en métodos estadísticos, la predicción acertada más famosa se registró previo al terremoto de Haicheng, China, en 1975, donde la identificación de la brecha aunado a la observación de cambios en la elevación del suelo, los niveles de aguas freáticas, el comportamiento de los animales y pequeños temblores permitieron la evacuación de la población unas horas antes del sismo.

Sin embargo, todo indica que la predicción se sustentó en una serie de coincidencias afortunadas y circunstanciales, en lugar de la aplicación de algún método verificado que estableciera una probabilidad de ocurrencia objetiva. Prueba de ello es que los expertos chinos no han logrado predecir correctamente ningún gran evento desde entonces.

De hecho, entre 1997 y 1999 se realizaron treinta predicciones equivocadas, lo que desestimó la credibilidad de los esfuerzos y obligó al gobierno chino a regular la publicación de las constantes alarmas para prevenir el pánico y las evacuaciones en masa (Saegusa, 1999).

Es valioso hacer notar que contrario a la creencia popular, un temblor de baja o moderada magnitud no libera la energía que evitaría un evento de magnitud importante; es decir, aunque los temblores pequeños ayudan a liberar la energía acumulada, no es posible que muchos temblores pequeños equivalgan a un temblor grande. Esto es, debido a que la escala de Ritchter establece magnitudes logarítmicamente, la liberación de energía no es equivalente entre los sismos: dos sismos de magnitud de 4 grados no equivalen a un sólo sismo de magnitud de 8 grados.

De hecho, conforme al Programa de Riesgo Sísmico del Departamento de Ciencias Geológicas de Estados Unidos, la energía acumulada en un sismo de magnitud 6 es equivalente unos 32 temblores de magnitud 5; unos 1,000 eventos de magnitud 4 o unos 32,000 sismos de magnitud 3, etc. (USGS, 2013a).

Entonces, aunque se identifique una cierta probabilidad de que se presente un evento sísmico sobre la base de la identificación de cierta periodicidad, la realidad es que no existe una certeza fidedigna de que esto ocurra verdaderamente. Uno de los casos más famosos es la predicción en Parkfield, Estados Unidos, donde se pronosticó un sismo originado en la falla de San Andrés, a partir de eventos previos registrados en 1857, 1881, 1901, 1922,

1934 y 1966 (Bakun et al., 1987). Así, el grupo de investigación identificó una brecha sísmica y un periodo de retorno aproximado de 22 años con una probabilidad de 90 a 95% de que el sismo ocurriera entre 1985 y 1993 con una esperanza máxima en 1988 (Figura 6). Sin embargo, el terremoto se presentó completamente alejado de la línea de tendencia hasta septiembre del 2004. Pese al fallido pronóstico, el estudio permitió avanzar en una mejor comprensión del proceso de los sismos de Parkfield, debido a que entre otros aspectos, los acelerogramas registrados en 1988 y el 2004 son significativamente parecidos.

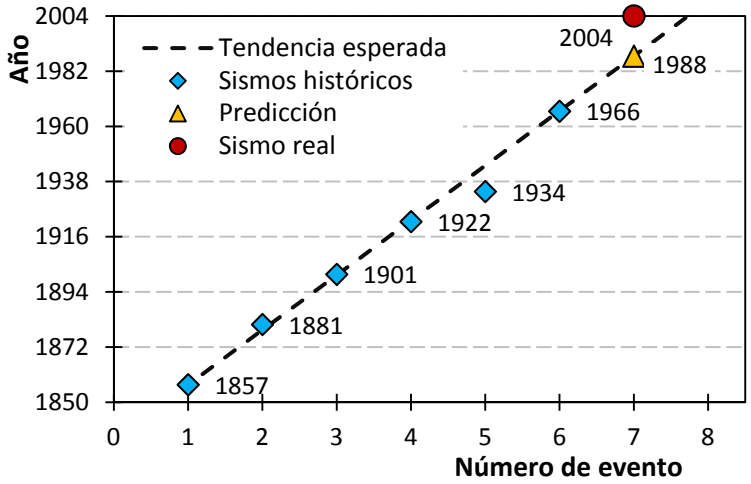

Figura 6: Proyección estadística del sismo esperado en Parkfield, Estados Unidos.

COMPORTAMIENTO ANIMAL

Comentario aparte merecen los métodos de predicción sísmica asociados con el comportamiento atípico animal. Algunos estudios reportan comportamiento inusual de peces, roedores, lobos y serpientes desde dos meses antes del sismo, como por ejemplo, previo al sismo de Tangshan, China, de magnitud 7.8 grados en julio de 1976 (Grant y Halliday, 2010). No obstante, la generalidad es que la conducta extraña se presente unos cuántos días antes.

En Tributsch (1984) se presenta una compilación de 78 sismos entre 373 a.C. a 1979, donde se argumenta que el comportamiento animal anormal puede ser usado como método de predicción antes de un terremoto. Por ejemplo: las serpientes y los gusanos emergieron a la superficie inexplicablemente dos días antes del terremoto de Helice en Grecia en el 373 a.C.; las ovejas, perros y gansos se alteraron al mismo tiempo minutos antes del terremoto de Nápoles en Italia de 1805 y una manada de caballos se turbó sin motivo provocando daños con su estampida antes del terremoto de San Francisco en Estados Unidos de 1906.

Más recientemente, Grant y Halliday (2010) estaban realizando un estudio sobre el impacto del ciclo lunar en las ranas (específicamente, la especie *Bufo bufo* o sapo común) cuando se produjo un terremoto en L'Aquila en Italia de magnitud de 6.7 grados en abril del 2009 y observaron que algunos días antes hasta el 96% de la colonia de anfibios abandonaron sin ninguna causa aparente los lugares usuales de apareamiento y el grupo no volvió por completo sino hasta que se produjo la última réplica. El estudio reporta perturbaciones en la ionósfera que coincidió con el movimiento de las ranas, lo que pudo ocasionar la alerta de los anfibios para emigrar a lugares supuestamente más seguros.

De hecho, Buskirk et al. (1981) demostraron que algunos animales son capaces de percibir ciertos tipos de estímulos relacionados con precursores de los terremotos: las aves y los peces son más sensibles a sonidos de frecuencias menores a 40 Hz, ciertos peces son sensibles a los cambios del campo eléctrico muy bajos, estímulos olfativos y otros son capaces de percibir las vibraciones de baja frecuencia a través de su piel. Estos resultados de laboratorio concuerdan con los intervalos de precursores geofísicos y geoquímicos relacionados con los terremotos como los que se mencionaron al inicio del artículo: la liberación de gases, campos magnéticos, sonidos de alta frecuencia, entre otros. Sin embargo, el estudio reconoce las pocas referencias cuantitativas de estas señales en sismos reales y la gran cantidad de variables. Por ejemplo, no existe evidencia de los precursores asociados a

sonidos de alta frecuencia (mayores a 10 kHz) o que los sonidos de alta frecuencia son atenuados a una distancia cercana al hipocentro del sismo.

Con esta referencia, el conocimiento de las capacidades sensoriales de los animales podría sugerir una estrategia de instrumentación para la detección de precursores si se orienta en la atención de ondas sísmicas a una frecuencia inferior a 50 Hz, cambios en el campo eléctrico, la ionización del ambiente, olores, efectos de variaciones eléctricas y electrostáticas.

Pese a todo lo anterior, la explicación generalizada sobre el comportamiento animal se centra en que cuando se genera un sismo, la propagación de ondas en el suelo se realiza de manera muy similar a la que se presenta en un estanque de agua en reposo después de aventar una piedra. En seguida de que ocurrió el sismo se propagan las ondas llamadas P o Primarias que transfieren movimientos de compresión entre los estratos del suelo y que son seguidas de las ondas S o Secundarias que son más destructivas debido una movimiento ondulatorio (Figura 7).

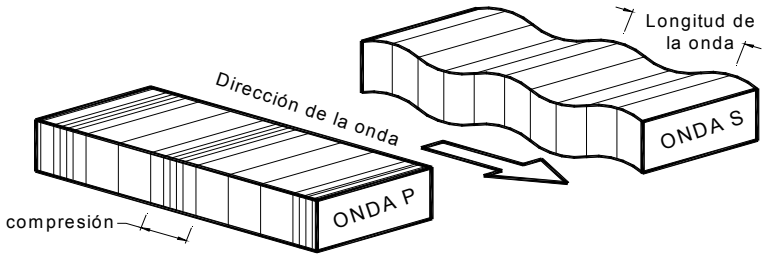

Figura 7: Ondas superficiales generadas por un sismo.

SISTEMAS DE ALERTA TEMPRANA

Como ejemplo de estos sistemas, la Alerta Sísmica para la Ciudad de México es un sistema que permite advertir a los habitantes del Distrito Federal Mexicano que ha ocurrido un sismo en la costa del Estado de Guerrero (Figura 4). El sistema consiste en una serie de estaciones sísmicas ubicadas al sur de México en la costa de Guerrero que al detectar que ha ocurrido un sismo de magnitud importante envían una señal de radio para advertir a la población. La ubicación de las estaciones se muestra en la Figura 4 mediante triángulos y círculos.

Es necesario hacer mención que el sistema funciona gracias a que la Ciudad de México se encuentra aproximadamente a 320 km de la costa (donde se presentan los epicentros del área de subducción entre la Placa de Cocos y la Placa Norteamericana) y a que la propagación más rápida de las ondas sísmicas en los estratos del suelo es de unos 8 km/s. Esto permite advertir a la población al menos 40 segundos antes de la llegada del sismo, ya que las ondas de radio viajan mucho más rápido que las ondas sísmicas (a unos 300,000 km/s).

El Sistema de Alerta Sísmico Mexicano se encuentra en operación desde 1991 (CIRES, 2012) y actualmente cuenta con el apoyo de estaciones de radio y televisoras locales comerciales para su difusión. Sin embargo, este método de difusión tiene una limitación importante, puesto que requiere que los receptores de previsión estén encendidos para emitir la señal audible de alerta, lo que se agrava durante la noche, cuando están apagados los radios y televisores. Por esta razón, se ha comercializado el equipo que emite la alarma por el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (CIRES) y/o por empresas que subcontratan el servicio del CIRES, que lo ponen a disposición de la población por un costo aproximado de $3,500 dólares norteamericanos.

PRONÓSTICO CIENTÍFICO

En el estudio de la sismicidad usualmente se pretenden determinar dos premisas básicas: a) la frecuencia con que pueden presentarse temblores de hasta una cierta magnitud en una región del mundo, y b) la máxima magnitud sísmica que puede presentarse. Por lo anterior, el pronóstico de un sismo se define como la declaración determinista de que un futuro terremoto pueda o no ocurrir en una región geográfica, un periodo de tiempo y una magnitud; mientras que el pronóstico de un sismo establece la probabilidad (mayor a cero, pero menor a uno) de que el evento ocurra para advertir a la población sobre el riesgo sísmico.

En México, aunque el Servicio Sismológico Nacional (SSN) se fundó en 1910, el inicio de los registros sísmicos inició en la década de los sesenta cuando la red mundial de estaciones sísmicas y el SSN mejoraron su cobertura y la precisión asociada a nuevas tecnologías de los instrumentos. El catálogo de la primera parte del siglo está basado en registros de instrumentos mecánicos y a partir de las publicaciones de periódicos y cronistas, lo que implica que los registros históricos están incompletos porque deben incluir eventos sísmicos intensos únicamente.

Sin embargo, la determinación más exacta de la magnitud de los sismos se consiguió a partir de la década de los setenta con la instalación a nivel mundial de estaciones digitales que permiten establecer la magnitud a través del momento sísmico. Esto significa que el estudio preciso de los sismos tiene apenas unos cuantos años.

Tabla 1: Sismos registrados en México (SSN, 2013).

Año	Magnitud en la escala de Richter							Total
	0 - 2.9	3 - 3.9	4 - 4.9	5 - 5.9	6 - 6.9	7 - 7.9	8 - 8.9	
1990	13	246	509	23	1	0	0	792
1991	6	184	510	30	2	0	0	732
1992	5	183	398	27	0	0	0	613
1993	48	275	548	40	5	1	0	917
1994	20	192	383	24	3	0	0	622
1995	16	188	438	26	6	2	0	676
1996	9	203	543	32	3	0	0	790
1997	57	388	533	34	5	2	0	1019
1998	13	453	531	21	5	0	0	1023
1999	13	540	527	11	4	2	0	1097
2000	37	463	531	18	2	1	0	1052
2001	17	704	585	32	6	0	0	1344
2002	4	879	761	40	4	0	0	1688
2003	5	729	568	18	3	1	0	1324
2004	1	429	491	24	0	0	0	945
2005	1	459	373	12	2	0	0	847
2006	0	589	464	23	1	0	0	1077
2007	0	533	670	27	4	0	0	1234
2008	4	1037	709	18	4	0	0	1772
2009	4	1552	594	31	3	0	0	2184
2010	12	2386	995	28	3	1	0	3425
2011	25	3321	788	30	4	0	0	4168
2012	24	3940	1054	52	9	2	0	5081
	$\Sigma=$	19873	13503	621	79	12	0	34422

Tabla 2: Distribución de la probabilidad de la actividad sísmica en México.

Herramientas estadísticas	Magnitud en la escala de Richter						Total
	3 - 3.9	4 - 4.9	5 - 5.9	6 - 6.9	7 - 7.9	8 - 8.9	
Media aritmética, μ	864.0	587.1	27.0	3.4	0.5	0.0	1,482.1
Desviación estándar, σ	1,036.5	1,79.3	9.5	2.1	0.8	0.0	
Peor escenario teórico	1,900.6	766.4	36.5	5.6	1.3	0.0	2,710.4

En la Tabla 1 se presenta un compilado de los sismos registrados en México en los últimos 22 años. Si se considera únicamente la cantidad total de sismos que se han presentado por año, la tabla parecería sugerir un

incremento de la actividad sísmica en los últimos años. Pero esto no es así, sino que el desarrollo de nuevas tecnologías ha permitido registrar sismos de menor magnitud que probablemente antes no eran fácilmente detectados por los instrumentos de la época.

A partir de esos registros históricos, en la Tabla 2 se muestra el cálculo de la media aritmética μ y la desviación estándar σ usando la corrección de Bessel para determinar la distribución de probabilidad e intentar predecir la actividad sísmica esperada el siguiente año. Este estudio no considera los sismos registrados en el intervalo de magnitudes 0-2.9 debido a que es muy probable que varios eventos no se hayan detectado o reportado.

La media aritmética indica la cantidad promedio de sismos esperados para el siguiente año y la desviación estándar establece la tendencia de las cantidades a alejarse del promedio de la distribución. Nótese que la desviación calculada es significativamente alta, lo que implica que la dispersión de la cantidad de sismos del catálogo de sismos históricos varía significativamente año con año. En este razonamiento, el peor escenario estadístico se define sumando a la media aritmética una desviación estándar ($\mu + \sigma$), que implica un contexto en el que se presentarán unos 2,710 sismos, donde aproximadamente siete eventos tendrían una magnitud superior a 6 grados.

Esta seguridad demostrada de que ocurrirán sismos en ciertas regiones geográficas del mundo incentiva el desarrollo de métodos de predicción de sismos que cuentan con una credibilidad injustificada. Puesto que después de la ocurrencia del sismo, los métodos pretenden validarse, aunque no hayan acertado en la fecha ni magnitud, bajo la premisa de que en términos generales predijeron el evento. Sin embargo, se trata de un sismo que de antemano todos deberían saber que se iba a presentar.

Desde otro punto de vista, los catálogos de grandes temblores de México han permitido estimar periodos de recurrencia de algunos segmentos de la zona de subducción entre la placa de Cocos y la placa de Norteamérica. Los periodos de recurrencia observados varían de 30 a 75 años para sismos originados al sur de México (Singh y Ordaz, 1994).

Supongamos entonces que de alguna manera se logra identificar un precursor (como la emisión de gas Radón ^{222}Rn) que funcione para predecir sismos de gran magnitud como el que se presentó el 20 de marzo del 2012 al Sur de Ometepec, Guerrero, México. En este hipotético escenario, la sociedad estaría interesada en conocer la ocurrencia de temblores de magnitud mayor a 6 grados en la escala de Richter, los cuales tienen periodos de retorno de al menos 30 años conforme a lo discutido en el párrafo anterior. Esto significaría que, conforme al método científico, sería necesario esperar unos 60 años (hasta el año 2073) para comprobar con tres eventos de magnitud mayor a 6.0 grados, la plena veracidad de la hipótesis y así poder predecir sismos con origen frente a las costas de Guerrero con una certidumbre objetiva. Desde otra perspectiva, para que en el 2013 se sustente la veracidad de algún método de predicción, este tuvo que haberse comenzado a verificar en el mejor de los casos desde 1953, lo cual es poco probable en todos los sentidos.

De hecho, en la actualidad, debido a que la búsqueda de precursores sísmicos que sirvan como un diagnóstico a corto plazo para la predicción de sismos no ha tenido éxito aún, la comunidad sismológica está más enfocada al pronóstico operativo de terremotos como el medio para la recopilación y difusión de información sobre los riesgos sísmicos para ayudar a las comunidades a prepararse contra los terremotos destructivos. Por ejemplo, Jordan et al*.,* (2011) presentan un reporte de una Comisión Internacional para el Pronóstico de Terremotos para la Protección Civil que se formó en Italia después del sismo de L'Aquila en el 2009. La Comisión, que estuvo conformada por expertos de China, Grecia, Japón, Italia, Rusia y Estados Unidos, realizó las siguientes recomendaciones al Departamento Italiano de Protección Civil (Jordan et al., 2011):

a. Apoyar la evolución científica del pronóstico probabilístico de terremotos y desarrollar los conocimientos necesarios para usar la información probabilista para efectos operativos.
b. Propiciar el flujo de datos de monitoreo sísmico y geodésico, a partir de laboratorios instrumentados que estudien el proceso de formación de los sismos.
c. Incentivar un programa de investigación básica sobre el conocimiento científico de terremotos y su previsibilidad.
d. Desarrollar modelos de pronóstico dependiente e independiente del tiempo para mejorar los mapas de peligrosidad sísmica a largo plazo orientados operacionalmente.

e. Mejorar la capacidad operativa de la predicción de réplicas y apoyar el desarrollo de métodos de predicción para cuantificar las variaciones de probabilidad a corto plazo.
f. Crear una comisión independiente de expertos para evaluar los métodos de predicción e interpretar sus resultados.

Entonces, considerando un espacio de probabilidad ($\digamma$, $\mathbb{P}$), siendo $\digamma$ el conjunto de eventos, $\mathbb{P}$ el conjunto de probabilidades, A el evento precursor y B la ocurrencia de un sismo ($A, B \in \digamma$), donde la probabilidad de que ocurra el evento precursor siempre existe $P(A) > 0$ y la probabilidad de que tiemble en esa región geográfica también se cumple $P(B) > 0$. Entonces, la probabilidad condicional de B dado A se define con la ecuación 2.

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \tag{2}$$

$P(A|B)$ se interpreta considerando que si B se cumple, la porción condicional de A se debe cumplir. Es decir, si el evento precursor identificado se presenta, la probabilidad condicional de que tiemble existe.

Gráficamente esto se explica en la Figura 8a, donde A es el precursor investigado, B es un temblor y $\digamma$ una región geográfica. La zona en color verde de la intersección representa la probabilidad de ocurrencia de B dado A; es decir, $P(A \cap B)$. El inconveniente de los métodos presentados en este artículo es que existe un espacio grande donde se puede presentar el precursor A asociado a otros fenómenos naturales que no están relacionados con la actividad sísmica (color azul). Igualmente, existe una alta probabilidad de que se presente un sismo sin que se presente el precursor B (color amarillo). Por esta razón, se han presentado los eventos precursores sin que posteriormente tiemble y también se han presentado sismos sin que se haya reportado *a priori* el evento precursor.

A partir de las investigaciones presentadas en el artículo, no hay duda que antes de un sismo existen eventos precursores que podrían servir de advertencia de la ocurrencia de un sismo; de modo que actualmente el objetivo de los estudios pretende desplazar el escenario de la Figura 8a a una mayor probabilidad de $P(A|B)$ mostrado en la Figura 8b. En ese escenario, existe una mayor probabilidad $P(A|B)$ de éxito de que ocurra B dado A, aunque aún existe un porcentaje de error de que se pronostique un sismo y no se presente, al igual de que se presente un sismo sin un evento precursor.

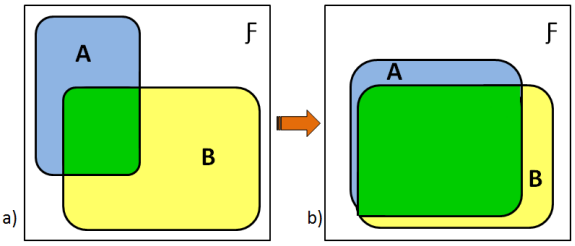

Figura 8: Probabilidad en un conjunto $\digamma$ de que A ocurra dado que ocurrió B.

Con este panorama, no queda sino reconocer que aún hay mucho por hacer en el tema para establecer un patrón de referencia que se pueda comparar con las reacciones del medio ambiente: eventos asociados a estímulos potenciales en el laboratorio que permitan estudiar los fenómenos precursores de un terremoto real.

El principal objetivo de los métodos de predicción de un estudio científico debe basarse en el pronóstico de la ocurrencia del terremoto y ubicación y magnitud aproximada para poder prevenir a la sociedad y no en la fama de los desarrolladores de la supuesta metodología. Desafortunadamente, como se demostró en este artículo, la aleatoriedad natural y la actividad sísmica frecuente en ciertas regiones del mundo son usadas para hacer predicciones que pueden contar con una creencia absurda. Por esta razón, la difusión de los métodos de predicción de sismos se debe realizar objetivamente, a partir de la formalidad de la metodología para establecer la ocurrencia, la cantidad de aciertos y las condiciones mediante las cuales fue comprobada.

CONCLUSIONES

Este artículo estudia la factibilidad de efectuar predicciones de sismos y pretende difundir la información disponible con sustento científico que se debería tener en cuenta para considerar e identificar esfuerzos serios para la predicción y/o prevención de los daños asociados a movimientos sísmicos, a fin de estar preparados e informados en caso de un terremoto y reducir así pérdidas potenciales.

Los métodos presentados se clasifican en dos categorías principales: a) métodos basados en precursores físicos que consideran observaciones directas; y b) métodos basados en patrones estadísticos y catálogos históricos.

El artículo presenta investigaciones que han identificado variaciones de mediciones que pueden ser consideradas como precursores de un sismo. Sin embargo, la gran mayoría de los reportes se basan en estudios de caso o ensayos retrospectivos que identifican un sismo como un evento que podría haber sido predicho con éxito, a partir del precursor que se identificó después de que ya se presentó el terremoto y que *a posteriori* ha sido difícil comprobar. Por esto, es notoria la diferencia con las investigaciones que pronostican un suceso en el futuro que aún no se presenta, a partir de algún análisis previo.

Desafortunadamente la predicción de los sismos tiene intrínsecamente una amplia cantidad de variables. Por ejemplo, las condiciones de cada región sísmica del mundo son demasiado particulares, lo que podría ocasionar que los precursores identificados para una cierta región geográfica no sean compatibles con las condiciones de otra parte del mundo. Igualmente, los modelos de ruptura sísmica conllevan simplificaciones de otras variables implícitas en el modelo de rebote elástico.

De manera general, una metodología propuesta para la identificación de precursores de un sismo debe considerar al menos los siguientes aspectos:

a. Definición de un sismo objetivo. La metodología debe identificar un conjunto de sismos que se predijeron previamente y que se usaron para evaluar la efectividad del método propuesto. Ese conjunto de eventos son sismo objetivo, porque acotan la predicción a eventos de una cierta magnitud, que debe ser igualmente especificada en el método.

b. Definición de un área geográfica. En congruencia con el inciso anterior, es necesario limitar la región del mundo para la cual el método ha sido probado. Dependiendo del método, se esperaría que esta definición pueda incluir información de la profundidad y ser especificada en coordenadas geográficas y no como un territorio del mundo, por ejemplo: Ometepec, Guerrero en coordenadas 16.42 latitud N y -98.36 longitud W, en lugar de “la costa sur de México”.

c. Definición de la duración del estudio. Se refiere al intervalo de tiempo durante el que se realizaron las predicciones, caracterizado por una fecha de inicio y una fecha de culminación.

d. Definición de la metodología. El método propuesto debe especificar un procedimiento que se debe seguir para realizar una predicción. Esto es, la secuencia de criterios que se deben aplicar en el método de predicción, que debe incluir ejemplos y pautas de la experimentación desarrollada.

e. Definición del nivel de confianza. La propia metodología debe establecer el grado de incertidumbre asociada al pronóstico; es decir, debe proporcionar una referencia del error de la predicción. De hecho, sería racional que una predicción a corto plazo de un sismo que establezca un lugar, fecha y magnitud esté asociado a un grado alto de incertidumbre.

Así, hasta el momento no ha podido ser identificado algún precursor sísmico veraz, confiable y repetitivo para predecir los sismos que permita conocer: a) la fecha de ocurrencia, b) la ubicación exacta del epicentro, y c) su magnitud, a pesar de que como se comenta en este artículo algunas investigaciones científicas formales han dedicado esfuerzos y recursos considerables para conseguirlo.

A diferencia de otros fenómenos naturales como viento intenso provocado por huracanes, erupciones volcánicas o tormentas severas, los sismos aún no son predecibles con un simple monitoreo constante, sino que siguen siendo eventos naturales inadvertidos, recurrentes e inevitables. Pese a lo anterior, el panorama no es desolador de ninguna manera, puesto que se tiene absoluta certeza de las regiones del mundo que deben considerar medidas precautorias

diarias para estar preparados para un terremoto. Esto debe guiar a las autoridades de todos los niveles, científicos, ingenieros de la práctica relacionados con el diseño y construcción de estructuras y a la población en general a dedicar esfuerzos para considerar, desarrollar y difundir medidas de seguridad para antes, durante y después de un posible sismo intenso. De manera que estar prevenido, informado y estar preparado para una posible contingencia en el peor escenario es una responsabilidad intransferible de cada individuo.

REFERENCIAS

CIRES (2012). Portal de internet del Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, A.C. www.cires.mx, México, Distrito Federal.

Curiel, G. (2010). "Teoría de las fuerzas gravitacionales", *Memorias del XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Aguascalientes, México.

Dragert, H., Wang, K. y James, T. S. (2001). "A silent slip event on the deeper Cascadia seduction interface", *Science Journal*, Vol. 292, pp. 1525-1528.

Bakun, W. H., Breckenridge, K.S., Bredehoeft, J., Burford, R.O., Ellsworth, W.K., Johnston, M.J.S., Jones, L., Lindh, A.G. , Mortensen, C., Mueller, R.J., Poley, C.M., Roeloffs, E., Schulz, S., Segall, P. y Thatcher, W. (1987). "Parkfield California, Earthquake Prediction Scenarios and Response Plans", Open File Report 87-192, US Department of the Interior, US Geological Survey, Menlo Park, CA.

Buskirk, R. E., Frohlich, C. y Latham, G. V. (1981). "Unusual animal behavior before earthquakes: A review of possible sensory mechanisms", *Reviews of Geophysics,* Vol. 19, No. 2, pp. 247-270.

Dutta H. N., Dabas, R. S., Das, R. M., Sharma, K. y Singh, B. (2007). "Ionospheric perturbations over Delhi caused by the 26 December 2004 Sumatra earthquake", *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 28, No. 13-14, pp. 3141-3151.

Franco S. I., Kostoglodov, V., Larson, K. M., Manea, V. C., Manea, M. y Santiago, A. (2005). "Propagation of the 2001-2002 silent earthquake and interplate coupling in the Oaxaca subduction zone, Mexico", *Earth, Planets and Space*, Vol. 57, pp. 973-958.

Gallo, J. M. (2010). "Planteamiento para la predicción de la intensidad de terremotos por movimientos de placas", *Memorias del XVIII Congreso Mexicano de Ingeniería Sísmica*, Aguascalientes, México.

Grant R. A. y Halliday, T. (2010). "Predicting the unpredictable", *Journal of Zoology,* No. 1-9, pp. 1-9.

Guo, G. y Bin, W. (2008). "Cloud anomaly before Iran earthquake", *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 29, No. 7, pp. 1921-1928.

Igarashi, G. y Wakita, H. (1995). "Geochemical and hydrological observations for earthquake prediction in Japan", *Journal of Physics of the Earth*, Vol. 43, No. 5, pp. 585-598.

Igarashi, G., Saeki, S., Takahata, N., Sumikawa, K., Tasaka, S., Sasaki, Y., Takahashi, M. y Sano, Y. (1995). "Ground-water radon anomaly before the Kobe earthquake in Japan", *Science Journal*, Vol. 269, No. 5220, pp. 60-61.

Jordan, T. H., Chen, Y-T., Gasparini, P., Madariaga, R., Main, I., Marzocchi, W., Papadopoulos, G., Sobolev, K. Yamaoka, K. y Zschau, J. (2011). "Operational earthquake forecasting. State of knowledge and guidelines for utilization", Final report by the International Commission on Earthquake Forecasting for Civil Protection, *Annals of Geophysics*, Vol. 54, No. 4, 75 p .

Omori, Y., Yasuoka, Y., Nagahama, H., Kawada, Y., Ishikawa, T., Tokonami, S. y Shinogi. M. (2007). "Anomalous radon emanation linked to pre-seismic electromagnetic phenomena", *Natural Hazards and Earth System Science*, Vol. 7, Issue 5, pp. 629-635.

Peña G, Pablo (2003). "Cambios de radón en suelo y elementos químicos y trazas en agua subterránea asociados a actividad sísmica", Tesis doctoral, Universidad Autónoma Metropolitana, México, D.F.

Nagamine, K. y Sugisaki, R. (1991). "Co-seismic changes of subsurface gas compositions disclosed by an improved seism-geochemical system", *Geophysical Research Letters*, Vol. 18, Issue 12, pp. 2221-2224.

Reasenberg, P. A. y Jones, L. M. (1994). "Earthquake aftershock: update", *Science*, Vol. 265, pp. 1251-125.

Richon, P., Sabroux, J. y Punongbayan, R. (2003). "Radon anomaly in the soil of Taal Volcano, the Philippines: A likely precursor of the M 7.1 Mindoro earthquake (1994)", *Geophysical Research Letters*, Vol. 30, No. 9, pp. 1481.

Richon, P., Klinger, Y., Tapponnier, P., Chen-Xia, L., Vann Der Woerd, J. y Perrier, F. (2010). "Measuring radon flux across active faults: relevance of excavating and possibility of satellite discharges", *Radiation Measurements*, Vol. 45, Issue 2, pp. 211-218.

Roeloffs, E. (1988). "Hydrologic precursors to earthquakes: a review", *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 126, No. 2-4, pp. 177-209.

Saegusa, A. (1999). "China clamps down on inaccurate warnings", *Nature,* Vol. 397, No. 6717, p. 284.

Segovia N., Mena, M., Peña, P., Tamez, E., Seidel, J. L., Monnin, M. y Valdés, C. (1999). "Soil radon time series: surveys in seismic and volcanic areas", *Radiation Measures,* Vol. 31, Issues 1-6, pp. 307-312.

Singh, S. y Ordáz, M. (1994). "Sismicidad y movimientos Fuertes en México: Una visión actual", *Cuaderno de investigación 18*, Centro Nacional de Desastres, Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), México, D.F.

Süer, S., Gülec, N., Mutly, H., Hilton, D. R., Cifter, C. y Sayin, M. (2008). "Geochemical monitoring of geothermal waters (2002-2004) along the North Anatolian fault zone, Turkey: spatial and temporal variations and relationship to seismic activity", *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 165, pp. 17-43.

Servicio Sismológico Nacional - SSN (2013). Portal del Servicio Sismológico Nacional, México, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, www.ssn.unam.mx.

Tributsch, H. (1984). *When the Snakes Awake - Animals and Earthquake Prediction*, The MIT Press, Cambridge, MA.

Toutain, J. P. y Baubron, J. C. (1999). "Gas geochemistry and seismotectonics: a review", *Tectonophysics,* Vol. 304, No. 1, Issues 1-2, pp. 1-27.

USGS (2013). "Historic world earthquakes*", Earthquake Hazard Program web site*, US Geological Survey, Department of the Interior, *http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/historical.php*.

USGS (2013a). "Earthquake facts and earthquake fantasy*", Earthquake Hazard Program web site*, US Geological Survey, Department of the Interior, *http://earthquake.usgs.gov/learn/topics/megaqk_facts_fantasy.php*.

Zheng, G., Xu, S., Liang, S., Shi, P. y Zhao, J. (2012). "Gas emission from the Qingzhu River after the 2008 Wenchuan earthquake, Southwest China", *Chemical Geology,* Vol. 339, pp. 187-193.

Zhou, X., Du, J., Chen, Z., Cheng, J., Tang, Y., Yang, L., Xie, C., Cui, Y., Liu, L., Yi, L.,Yang, P. y Li, Y. (2010). "Geochemistry of soil gas in the seismic fault zone produced by the Wenchuan Ms 8.0 earthquake, southwestern China", *Geochemical Transactions Journal*, Vol. 11, No. 5.