

Inteligencia geoespacial para desastres sísmicos: investigaciones en CentroGeo

ELVIA MARTÍNEZ VIVEROS*

Resumen: *En este artículo se reseñan tres proyectos de investigación del CentroGeo: aplicación del método DInSAR para estimar el impacto de un sismo en el desplazamiento del suelo en el espacio-tiempo; aplicación del sistema LIDAR para analizar la relación entre la aceleración de ondas sísmicas y la altura de las edificaciones, y estimar la vulnerabilidad en áreas pequeñas; y el desarrollo de plataformas geoespaciales en Web para soportar cartografía generada por voluntarios, útil para la gestión de emergencias. Finalmente, se propone un Servicio Público de Información para acercar a la población conocimiento relevante para su toma de decisiones en el ciclo del desastre.*

Abstract: *This article reviews three research projects at CentroGeo: the use of DInSAR to estimate the probable impact of an earthquake on soil subsidence in space-time; the use of the LIDAR system to analyze the relationship between the acceleration of seismic waves and the height of buildings and to estimate social vulnerability in small areas; and the development of geospatial platforms on the Web to support mapping by volunteers with valuable information for emergency management. Lastly, an Internet Public Information Service is proposed to bring the population key knowledge for decision making during the disaster cycle.*

Palabras clave: interferometría, subsidencia, LIDAR, cartografía de voluntarios, desastres.

Key words: interferometry, subsidence, LIDAR, volunteer cartography, disasters.

Un sismo deja su huella sobre la superficie terrestre, la cual se expresa de manera más contundente si el evento causó un desastre de gran magnitud. Esta huella puede ser anticipada con cierta probabilidad por expertos que construyen escenarios de peligro; puede detectarse de manera muy rápida después de la ocurrencia del desastre con imágenes captadas por sensores remotos de observación de la Tierra, y se puede dar seguimiento a su evolución a lo largo de las etapas de recuperación y reconstrucción. Es un argumento de este artículo que los datos y las tecnologías geoespaciales permiten un análisis más robusto y

* Doctora en Sistemas de Ciencias Sociales por la Universidad de Pennsylvania. Centro de Investigación en Ciencias de la Información Geoespacial (CentroGeo). Temas de especialización: sistemas de ciencias sociales y planeación espacial. Contoy 137, Lomas de Padierna, Tlalpan, 14240, Ciudad de México.

una gestión más efectiva de los desastres causados por sismos, y con ello contribuyen a mejorar la resiliencia social.

La gestión del ciclo del desastre sísmico requiere de un cúmulo de información conectada a la ubicación. La estimación de los riesgos y su distribución en el espacio urbano, así como los factores que inciden en la construcción social de la vulnerabilidad de la población expuesta, son de gran valor para la prevención. La gestión de la emergencia se beneficia de la localización de daños, víctimas, albergues o centros de acopio, así como de vías para trasladar heridos o canalizar ayuda de cuerpos de rescate y voluntarios. Información georreferenciada de edificaciones derrumbadas o dañadas con atributos que registren datos de los dueños u ocupantes, los niveles de su deterioro o las necesidades de ayuda para su reconstrucción, es primordial en la etapa de reconstrucción, como también lo es informar a los damnificados en particular y a la sociedad en general sobre los programas de reconstrucción, los requisitos y procedimientos para acceder a ellos, los lugares en que se implantarán, los recursos que manejan y los mecanismos y responsables para su canalización.

Los datos geospaciales describen la localización de las cosas en la superficie de la Tierra, con sus rasgos o características. Las herramientas geospaciales permiten gestionar y modelar estos datos para crear productos de visualización y análisis útiles en la gestión de los desastres.

Desde inicios de este siglo, un Comité de Planeación para Catástrofes resaltaba la relevancia de las ciencias y las tecnologías de información geoespacial para su aplicación en el ciclo del desastre y anunciaba la necesidad de construir procesos de Geointeligencia (GEOINT) orientados a abordar las distintas etapas de este ciclo. Este Comité concebía la GEOINT como “la explotación y análisis de imágenes e información geoespacial para descubrir, evaluar y representar visualmente los rasgos físicos y las actividades georreferenciadas en la Tierra” (National Research Council, 2006: 9). La relevancia de la GEOINT se veía en el análisis integral de las tres componentes: imágenes, inteligencia de imágenes e información geoespacial, y en la capacidad de crear una imagen comprehensiva de un área específica utilizando una amplia variedad de sensores y tipos de datos geospaciales. Posteriormente, la GEOINT evolucionó para abarcar campos transversales del conocimiento, como la analítica visual, la observación de comportamiento humano o la obtención de datos georreferenciados por ciudadanos voluntarios, así como la vinculación de productos de inteligencia geoespacial con procesos de toma de decisiones

para la solución de un problema y con formas más inclusivas de acceso y comprensión de los datos geoespaciales (National Research Council, 2010). Así, la GEOINT se propone como un proceso que involucra una actividad analítica que desemboca en un producto de inteligencia que puede ser utilizado para la solución de un problema específico, y como un proceso que no incluye únicamente a geoespecialistas, sino que incorpora también la interlocución con especialistas, funcionarios, investigadores o ciudadanos en el análisis y construcción de conocimiento e inteligencia para apoyar la prevención, frenar la ocurrencia de desastres y construir formas efectivas y eficientes de gestión de los mismos.

Desde esta perspectiva, este artículo reseña las líneas de investigación en inteligencia geoespacial que se desarrollan en el Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial (CentroGeo). En este sentido, en las siguientes secciones se reportan tres líneas de investigación en curso:

La primera de ellas aporta al conocimiento del impacto probable de los sismos en el desplazamiento del suelo y tiene potencial para informar investigaciones de expertos geólogos y sismólogos y en el estudio de la vulnerabilidad social en el espacio urbano. Esta línea de investigación utiliza datos de imágenes satelitales de radar, se enfoca al análisis de los cambios en el espacio-tiempo de los desplazamientos del suelo y se basa en el método de interferometría de radar de apertura sintética (InSAR).

La segunda línea se ubica en el campo de la percepción remota y trata sobre la aplicación del sistema de medición topográfica LIDAR, que permite reconstruir modelos 3D de edificaciones. Éstos son útiles para simular la relación entre la aceleración de las ondas sísmicas y la altura de las edificaciones, la estimación de vulnerabilidad en áreas pequeñas y la estimación, también en estas áreas, del efecto de un sismo en el desplazamiento del suelo.

La tercera línea se posiciona en procesos de mapeo colectivo que permiten registrar datos geoespaciales casi en tiempo real, aprovechando las facilidades de la Web 2.0 y la amplia difusión de la portabilidad de dispositivos móviles con GPS y conectados a Internet. Estos procesos surgen de redes de ciudadanos con conocimiento local suficiente para realizar observaciones en el espacio geográfico, de procesos de cartografía de voluntarios o de fenómenos colectivos como el llamado *crowdsourcing*. La contribución de estos procesos a la gestión de la emergencia causada por el desastre ha sido ampliamente documentada en la literatura y su

uso se está volviendo una práctica habitual de la respuesta ciudadana para la atención a desastres.

Las ciencias y tecnologías de información geoespacial han sido muy utilizadas desde distintas disciplinas, instituciones y grupos de usuarios para comprender, visualizar y difundir escenarios espaciales de peligros probables, los grados de exposición de la población e infraestructura, y las vulnerabilidades que de ellos se pueden estimar. No obstante, se aprecia la necesidad de integrar un Servicio Público de Información en Web que acerque a la población, de manera sencilla y transparente, la información relevante para su toma de decisiones a lo largo del ciclo del desastre. En la cuarta sección de este artículo se plantean las características generales que una plataforma de este tipo debiera tener, destacando su relevancia en la generación de resiliencia social.

LA MEDICIÓN DEL DESPLAZAMIENTO DEL SUELO CON EL MÉTODO DE INTERFEROMETRÍA DE RADAR

La doctora Alejandra Aurelia López Caloca encabeza en CentroGeo un grupo de investigación en el que colabora con tres doctores del programa de cátedras del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) y con tecnólogos del Laboratorio Nacional de Geointeligencia. Las líneas de investigación de este grupo incluyen el procesamiento digital de imágenes de radar con el método de interferometría de radar diferencial (DinSAR). Este método permite estimar el desplazamiento del suelo y el propósito de la investigación es observar cambios en el espacio-tiempo de estos desplazamientos. En este marco, el método permite mostrar los impactos de un sismo asociados con la deformación de la superficie del suelo.

El radar es un sensor activo que emite un haz de microondas con el que ilumina los objetos con una radiación coherente y recibe una señal electromagnética de retorno, que se mide por la amplitud de su onda, la cual describe un patrón sinusoidal regular. La interferometría es un método de procesamiento de datos derivados de la observación de la Tierra con sensores de radar de apertura sintética (SAR, por sus siglas en inglés). Este sensor mide una señal que genera datos en formato de números complejos,¹ cuya parte real se denomina amplitud y la parte imaginaria, fase.

¹ En términos llanos, se pueden comprender los números complejos como un grupo de cifras resultantes de la suma de un número real y uno imaginario.

Por mucho tiempo, los datos de amplitud se utilizaron para extraer información de objetos o características de la superficie del suelo. Fue hasta 1992 que se empezó a experimentar con los datos de la fase. Específicamente se observó que al comparar dos imágenes de radar (amplitud y fase) de un mismo sitio y con las mismas condiciones de adquisición (ángulo, distancia, orientación y polarización del sensor), se producía un patrón de franjas o patrón interferométrico. Se observó que este patrón guardaba una asociación espacial con la erupción de un volcán, esto es, las mediciones en un área afectada por actividad volcánica se relacionaban con las franjas interferométricas. Posteriormente se observó también que donde había movimientos provocados por un sismo se presentaban las franjas. Nació así la investigación en interferometría de radar, en cuya línea se fueron desarrollando los fundamentos teóricos para comprender la componente de fase. Actualmente, esta investigación abarca diversas dinámicas territoriales como las relacionadas con las variaciones, positivas y negativas, en el desplazamiento vertical del suelo. Estos procesos son normales puesto que la corteza terrestre no es rígida, pero sobrepasando cierto umbral de hundimiento, el suelo pierde capacidad de resiliencia. Así, resulta relevante medir el proceso, con el fin de encontrar medidas para frenar el hundimiento o subsidencia del suelo cuando aún es reversible.

Desde 2014, la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés) entró en la fase operacional de un programa denominado Copernicus (Copérnico) para el estudio global del cambio climático, el medio ambiente y sus efectos en la Tierra. Este programa se fundamenta en datos de satélites que observan y miden propiedades específicas de la Tierra, con un diseño tecnológico innovador que incluye instrumentos de medición muy sensibles. Implica a ocho satélites llamados Sentinel, que portan una amplia variedad de sensores y están destinados a distintas aplicaciones. Cinco de estos satélites están ya en órbita, dos de ellos con sensores de radar. Producen imágenes cada seis días, con una resolución media de 20 metros y coberturas de una misma escena de la superficie terrestre en bandas que representan regiones de alrededor de 62 500 km², cobertura que permite trabajar con mosaicos regionales del territorio. Los escenarios básicos de observación del sistema Sentinel abarcan Europa y diversas regiones de otras partes del mundo. Otros satélites de alta resolución con estas bandas no ofrecen la información con tanta frecuencia en el tiempo, ni con la apertura y gratuidad de las imágenes de Sentinel.

En la ESA, los estudios de interferometría se enfocan principalmente en las masas polares, pues el interés, en términos del cambio climático, se ubica en el fenómeno de los deshielos. No obstante, su agenda de investigación con este método incluye las formas de expansión del medio construido de las ciudades y diversos procesos de subsidencia.

La detección de cambios en el espacio geográfico con imágenes de radar tradicionalmente se ha limitado a análisis comparativos de unas cuantas imágenes captadas en distintas fechas. La frecuencia de adquisición de imágenes de Sentinel 1A y 1B ha permitido que, en CentroGeo, el grupo de investigación en procesamiento digital de imágenes de radar aproxime estos cambios desde la perspectiva de la dinámica de los procesos, abordando *el análisis de la evolución de diversos rasgos del territorio en el tiempo*. Contar con imágenes de una misma escena cada seis días representa una oferta masiva de datos cuyo procesamiento ha requerido incursionar en el terreno de los *Big Data* y de formas de análisis y modelaje del espacio-tiempo.

La información del radar de Sentinel 1 abre la posibilidad de dar seguimiento a la dinámica de diversos procesos territoriales,² entre ellos el de subsidencia. En este sentido, y en relación con la aportación de este método al estudio del riesgo sísmico, se construyeron, para la Ciudad de México, interferogramas entre imágenes del 10 de julio de 2017 (antes de los sismos) y otras del 20 de septiembre de 2017 (un día después del sismo). No es posible comunicar en blanco y negro los resultados preliminares de este análisis de subsidencia. El lector interesado puede explorarlo en línea,³ y con ello observar los interferogramas. Sus franjas se relacionan con la velocidad de la subsidencia; en la medida que éstas son más estrechas, la deformación de la superficie terrestre es mayor. En el mismo sitio en línea es posible consultar los mapas de desplazamiento vertical relativo, que alcanzó un máximo de -25 cm en algunos lugares

² En el marco de esta línea de investigación, el grupo de la doctora López Caloca analiza, entre otros factores, la dinámica de cambio estacional y conectividad de los cuerpos de agua continentales, las formas de expansión del medio construido y los cambios en la línea de costa. En todos estos casos, los instrumentos de radar, a diferencia de los ópticos, no se ven afectados por la cobertura nubosa o de lluvia para captar una imagen, ya que atraviesan las nubes y la oscuridad.

³ En la página del CentroGeo: <<http://www.centrogeo.org.mx/index.php/desplazamiento-en-la-cdmx-resultante-de-los-sismos-de-septiembre-de-2017>> [última consulta: 4 de abril de 2018].

de la Ciudad de México, cifra que supera el promedio de hundimiento anual de la ciudad, que oscila entre -2.5 y -2 cm/mes.

Estos resultados corresponden únicamente a un comparativo entre dos fechas, y en este sentido son preliminares. Su principal contribución se hará cuando esta observación se ubique en un estudio de series de tiempo que permita establecer las tendencias normales del desplazamiento del suelo en los distintos sitios, con el fin de poder estimar con mayor certeza la contribución de un cambio brusco en esta tendencia y en periodos más largos, tal vez de un año.

La detección del desplazamiento del suelo a partir de mediciones a distancia (con sensores satelitales de radar) requiere validarse con mediciones selectivas *in situ*. Los interferogramas son instrumentos útiles en el análisis de los efectos de un sismo. Se deben considerar como información sobre las deformaciones del suelo derivadas de un sismo, útil para complementar los estudios y las mediciones de especialistas geólogos y sismólogos. Finalmente, es relevante destacar que no existe una relación directa entre los desplazamientos del suelo y los derrumbes o daños causados por un sismo en viviendas o infraestructura.

LA EXTRACCIÓN DE MODELOS DIGITALES 3D DEL ENTORNO URBANO CON LIDAR

La investigación en percepción remota es el área de especialidad del doctor José Luis Silván-Cárdenas, quien, entre sus líneas de investigación, ha incursionado en aplicaciones del sistema de detección y medición de distancia por luz (LIDAR por sus siglas en inglés). Se trata de un sistema de medición topográfica que emite una señal luminosa con pulsos de muy alta frecuencia (tren de láser pulsado) y detecta su reflejo o señal de retorno para determinar la distancia a que se encuentra el objeto que lo reflejó y, a partir de ella, su posición en el espacio.

Las innovaciones en el proceso de mapeo topográfico incluían, para mediados del siglo XX, la medición electrónica de distancia usando, primero, tecnología de microondas y, más adelante, láser (User, Varanka y Finn, 2010). El sistema LIDAR tiene sus antecedentes en la década de los años sesenta, con la invención del láser de estado sólido y semiconductor, y con estudios empíricos para medir la distancia con perfiladores aerotransportados. El potencial de LIDAR en el mapeo topográfico se pudo desplegar en los años noventa, con la integración de la red de satélites

en que se basa el Sistema de Posicionamiento Global (GPS por sus siglas en inglés), que permite determinar, con buena precisión, las posiciones horizontales de los objetos aun en los terrenos más remotos, y que ha sido crucial en el mapeo de la superficie terrestre con datos remotos.

En sincronía con el GPS, se crean los escáneres láser y se comercializan dispositivos electrónicos de medición inercial (IMU, por sus siglas en inglés) que informan la posición y la orientación de salida de los pulsos láser, lo que permite la medición robusta de la posición de los objetos a distancia. Surge así un terreno fértil para la fase de experimentación con el sistema LIDAR (de 1994 a 2000). En los albores del siglo XXI, el uso de LIDAR aerotransportado ha proliferado tanto en el ámbito de aplicaciones comerciales como en el de la investigación. Los mapas topográficos que se generan con LIDAR son de muy alta resolución. Su precisión se mide en centímetros.

Las habilidades de este sistema para “detectar rasgos topográficos sutiles como terrazas y bancos en los ríos, medir la elevación de la superficie del suelo debajo de la cubierta vegetal, resolver mejor las derivaciones espaciales de la elevación, y detectar los cambios de elevación entre distintos levantamientos de datos, han permitido muchos estudios novedosos de los procesos físicos y químicos que forman el paisaje” (Ganeev, 2014: 35). Ejemplos de aplicaciones se encuentran en mapas de pendientes y exposición a la luz solar, útiles en la agricultura; mapas de elevación vertical de los árboles y modelos de comportamiento de incendios forestales, útiles en planeación y gestión de bosques; detección de áreas afectadas por actividad humana, y modelos de inundaciones, entre muchas otras.⁴

El acceso a datos LIDAR no es difícil, pero sí costoso. En México hay algunas empresas con los aviones y sensores necesarios. El costo del levantamiento se cotiza por km² y se requiere de una superficie mínima de observación. Más oneroso resulta aún el traslado del equipo al área del levantamiento. También se requiere personal en campo que coloque los puntos de control para calibrar y validar los datos (sus errores horizontales y verticales).

En 2007 y 2008, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) levantó con equipo LIDAR, que entonces era de su propiedad, datos en varias regiones de México. Entre ellas, Valle de México, Volcán de Colima, Golfo y Tabasco (regiones relevantes por su alto riesgo de

⁴ En la página de LIDARUSA, We are LIDAR: <<https://www.lidarusa.com/50-applications-for-lidar.html>> [última consulta: 16 de marzo de 2018].

inundación), y zonas de relevancia natural, como los santuarios de la Mariposa Monarca en Michoacán y Estado de México. La densidad de puntos de esta base de datos es baja (aproximadamente un punto cada 2 m²). Cabe señalar que otras fuentes de datos LIDAR se pueden obtener en instituciones o empresas que los levantan para proyectos específicos y van creando un acervo propio que podría compartirse para su aplicación en investigaciones con otros fines.

En el CentroGeo, el doctor Silván-Cárdenas ha aplicado el sistema LIDAR en diversas investigaciones, algunas con potencial de utilizarse en una etapa del ciclo de desastre sísmico. En este marco, desarrolló y probó una metodología de estimación de población en áreas pequeñas (áreas geoestadísticas básicas [AGEBS] y manzanas) empleando imágenes de alta resolución espacial y datos de altimetría adquiridos mediante el sensor LIDAR aerotransportado, así como datos vectoriales del catastro (Silván-Cárdenas, Montejano-Escamilla y Cervantes-Salas, 2015).

Para estimar la población, se corrieron modelos para tres delegaciones representativas de densidades alta, media y baja. Se encontró que se puede construir un modelo de estimación que prácticamente no depende de la densidad de población. Esto es, con una buena estimación del espacio habitable es posible estimar la población con un error relativo del 5%. Este modelo permite, entre otras cosas, evaluar la vulnerabilidad con base en la densidad de población en áreas pequeñas y, con ello, localizar de manera más precisa los lugares críticos.

Aunque en esta investigación el modelo en 3D se usó para la estimación de población, tiene diversas aplicaciones en el análisis de los fenómenos sísmicos. En el colapso de las edificaciones intervienen variables relacionadas con la cimentación, los materiales de construcción y la altura. Diversos estudios indican que, de éstas, la altura es una variable clave. El doctor Silván-Cárdenas dirigió un proyecto de tesis en el que se evalúa el grado de vulnerabilidad sísmica en función del índice de daño físico que pueden tener diferentes construcciones de la zona norte de la delegación Benito Juárez de la Ciudad de México ante sismos de intensidad extraordinaria. Esta evaluación se basó en datos geoespaciales, como imágenes satelitales de alta resolución QuickBird, un modelo digital de elevaciones LIDAR e información catastral en formato vectorial de la zona estudiada. El resultado es un mapa de riesgo determinado por la altura de las edificaciones, que puede ser de interés para el análisis de este fenómeno por los expertos en la materia o para la simulación de

evacuaciones, que son útiles para comprender comportamientos en la etapa de emergencia (García-Magaña, 2015).

La nube de puntos de LIDAR no sólo permite detectar la altura de los edificios, sino también la elevación del terreno, y con ello generar mapas topográficos de muy alta precisión. La comparación en el tiempo de estos mapas (antes y después de un sismo) permite medir desplazamientos del suelo. Esta técnica es muy costosa, pero su aplicación puede ser útil para estimar el impacto de sismos en lugares de importancia estratégica (por ejemplo, en el sitio donde se construyen las pistas del nuevo aeropuerto de la Ciudad de México).

Buscando una alternativa menos costosa que LIDAR, el doctor Silván-Cárdenas actualmente experimenta con técnicas de restitución fotogramétrica, realizando una reconstrucción 3D a partir de grandes cantidades de fotografías oblicuas de un área, tomadas desde múltiples vistas. El lector interesado puede observar en línea esta reconstrucción.⁵ Las fotografías se toman desde un dron y, por su cantidad, se pueden producir nubes de puntos densas que muestran detalles de interés para estudios urbanos. A partir de estos puntos y con un algoritmo de triangulación, se generan modelos 3D de malla o redes triangulares irregulares de edificaciones y árboles, que ofrecen amplias posibilidades de investigación y aplicación.

La forma de trabajo con el sistema LIDAR muestra cómo las nuevas tecnologías permiten observar y modelar un fenómeno con enfoques novedosos y generar información relevante para el estudio de los fenómenos naturales y su relación con la construcción social del riesgo.

ACTIVIDADES COLECTIVAS DE MAPEO Y ANALÍTICA GEOVISUAL

Crowdsourcing, Información Geográfica de Voluntarios (VGI, por sus siglas en inglés) y ciencia ciudadana son tres de los términos que se han acuñado para referirse a las actividades colectivas de mapeo. El *crowdsourcing* describe una forma de trabajo colectivo y compartido en el que grandes grupos de ciudadanos, carentes de entrenamiento computacional o cartográfico, proveen datos geoespaciales relacionados con su conocimiento local del espacio cotidiano. VGI lo propone Michael Goodchild (2007: 212) como un caso especial de generación de contenido en la Web por

⁵ En YouTube: <<https://www.youtube.com/watch?v=91xhKFTGEEk&feature=youtu.be>> [última consulta: 4 de abril de 2018].

los usuarios. Hace referencia a ciudadanos que, con pocas calificaciones formales, crean información geográfica, función que por siglos se habían reservado las agencias oficiales. Estos ciudadanos generan datos geoespaciales de manera voluntaria, que pueden o no ser precisos, pero que tendrán impacto en los sistemas de información geográfica, la geografía y el público en general. La ciencia ciudadana, con un significado altamente relacionado con VGI, hace referencia a redes de personas que aportan observaciones relacionadas con algún dominio de la ciencia, del que tienen cierto conocimiento formal (2007: 218). Los participantes en estos procesos pueden acordar de antemano el propósito y la forma de colaboración; en otros casos, éstos surgen como un fenómeno colectivo. Pero en todas las ocasiones las personas actúan como sensores, ya sea a través de los dispositivos móviles que portan cotidianamente o mediante el uso de sus sentidos y su inteligencia para compilar e interpretar lo que observan en su entorno (2007: 217).

Estos procesos, que han cambiado las formas de generación, intercambio y disseminación de datos, se basan en tecnologías en Web, se facilitan con el uso de GPS y de plataformas abiertas —como OpenStreetMap (OSM) o Google Maps— que permiten incluir datos geoespaciales digitales, y usan las redes sociales para difundirlos. “Sugieren que la producción de conocimiento espacial digital, que antes era un proceso llevado a cabo por un número finito de productores conocidos, se está volviendo un proceso de colaboración entre un número infinito de productores que pueden o no conocerse entre ellos” (Elwood, 2008: 177).

Los datos que en ellos se generan no necesariamente están estructurados formalmente, esto es, no responden a las normas y estándares para la producción de datos que siguen las instituciones formales de estadística y geografía. Aunque la validez de estos datos puede cuestionarse por su falta de apego a estándares, en palabras de Michael Goodchild y Alan Glennon (2010: 233), “la información obtenida por una muchedumbre de observadores tiene la probabilidad de estar más cerca de la verdad que la obtenida por un solo observador”. A esto habría que añadir que la información producida por ciudadanos voluntarios fluye casi en tiempo real y su oportunidad es invaluable en las situaciones críticas que se presentan durante la emergencia generada por un desastre.

Procesos de VGI y *crowdsourcing* han tenido un vasto rango de aplicaciones. Entre ellas: ampliar la participación ciudadana en la toma de decisiones sobre diversos programas públicos en distintas escalas, facilitar la expresión de propuestas colectivas para la mejora del entorno urbano,

dar visibilidad a asentamientos informales no detectados en la cartografía oficial o narrar historias colectivas (Mattioli, 2014). Su aplicación en la respuesta a emergencias causadas por desastres es cada vez más prevalente y está siendo ampliamente documentada. En el caso de desastres resultantes de un sismo se encuentra el ejemplo emblemático del sismo del 12 de enero de 2010 en Haití, en el que un grupo de voluntarios, en el marco de un vacío de información cartográfica oficial, estableció una red de apoyo ciudadano basada en plataformas como OpenStreetMap y Ushahidi para, por medio de un proceso de *crowdsourcing*, ubicar a las personas damnificadas y canalizar la ayuda disponible (Zook *et al.*, 2010). Otro ejemplo es la identificación del área de impacto del sismo del 23 de agosto 23 de 2011 en la costa este de Estados Unidos a través de la actividad de Twitter (Crooks *et al.*, 2013). Un tercer ejemplo es el proceso de *crowdsourcing* de OSM en apoyo a la logística de respuesta a la emergencia causada por el sismo del 25 de abril de 2015 en Nepal.⁶ Vale la pena aquí citar el proyecto Verificado19S, que se apoyó en voluntarios y en varias organizaciones de la sociedad civil para llenar formatos para reportar en Google Maps derrumbes, fugas de gas, daños estructurales, disponibilidad de albergues y centros de acopio y reportes de información sobre necesidades/ofertas.⁷ Ejemplos como estos dan cuenta de la capacidad de la ciudadanía para apoyar la gestión de emergencias por medio del mapeo colaborativo. En este sentido, Matthew Zook (2010: 13) hace alusión al “potencial liberador de las tecnologías [que apoyan estos procesos] y su realización en la práctica”.

En el CentroGeo, el maestro Rodrigo Tapia-McClung realiza la investigación para su tesis doctoral en esta línea de trabajo. El antecedente más cercano se remite a un proyecto muy exitoso de Geografía de Voluntarios que un grupo de investigación del CentroGeo llevó a cabo en alianza con el grupo ciudadano Consejo Vecinal Roma (CoVe). Tapia-McClung participó en este proyecto como investigador y como desarrollador de una plataforma digital geoespacial que “representa un ejemplo de cómo formas contemporáneas de hacer, leer y usar los mapas pueden vincularse con el interés de los ciudadanos de participar en la toma de decisiones que impactan su vida cotidiana” (Martínez-Viveros *et al.*, 2017: 238).

⁶ En la página de OpenStreetMap: <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/2015_Nepal_earthquake> [última consulta: 14 de marzo de 2018].

⁷ En la página de #VERIFICADO19S: <<http://www.verificado19s.org>> [última consulta: 4 de abril de 2018].

La plataforma fue desarrollada con herramientas y software libre y abierto. Las capas de los mapas se despliegan con Leaflet JS; la colección y el almacenamiento de los datos se soportan con PostgreSQL; el desarrollo de la interfaz se realizó con Bootstrap y jQuery, usando iconos de librerías de JavaScript como FontAwesome y Maki. La comunicación entre el cliente y el servidor se hace con PHP. Finalmente, el mapa en Web de interfaz con el usuario se despliega indistintamente con Google Maps y OpenStreetMap (Martínez-Viveros *et al.*, 2017: 247).

Los ciudadanos captaron en esta plataforma información que era del interés de CoVe y se relacionaba con los rubros de negocios, servicios, bienes inmuebles, condiciones de inseguridad, basura, e infraestructura para la movilidad y la accesibilidad. El objetivo era usar los mapas generados para facilitar la participación, la reflexión y la toma de decisiones entre los actores interesados en lograr un espacio limpio, seguro e incluyente en su colonia. Los voluntarios fueron vecinos, estudiantes o comerciantes que cotidianamente viven este espacio y tienen un alto conocimiento local sobre sus problemas y sus activos. Son ellos quienes alimentaron los datos en la plataforma y, al hacerlo, crearon los mapas de manera colectiva.

Aunque esta plataforma no se enfocó propiamente en el tema de desastres por sismos, tiene un gran potencial para aplicarse en la gestión de desastres, particularmente en la etapa de emergencia. Sus funcionalidades permiten, durante la etapa de emergencia, georreferenciar en línea, en tiempo real y de manera muy amigable, los lugares donde existe un problema (derrumbe, persona afectada, necesidad de asistencia médica, agua, alimentos o herramientas de rescate, entre otros) o se encuentran capacidades de respuesta (albergues, voluntarios rescatistas, centros de acopio, vehículos para transportar ayuda, entre otros). Además de la ubicación de problemas y formas de respuesta, es posible registrar las características de los mismos, como la capacidad de un albergue y su grado de ocupación, la situación crítica de una víctima, el lugar al que una persona rescatada se ha trasladado, la cantidad de personas que requieren alimentación en un albergue, los inventarios de los centros de acopio, etcétera. Cada dato puede acompañarse de observaciones cualitativas y de fotografías que lo precisan y lo validan. También es posible registrar en la plataforma correcciones en estos datos y cambios en los mismos; por ejemplo, cuando un albergue está ocupado en toda su capacidad o cuando víctimas de un derrumbe han sido rescatadas. Finalmente, las características tecnológicas de la plataforma permiten generar mapas sintéticos de manera automatizada y acceder a funcionalidades de análisis.

tica visual que plasman en mapas y gráficos la relación entre problemas y lugares, lo que permite al usuario detectar las zonas específicas donde convergen los problemas y requieren una atención prioritaria.

Tapia-McClung ha continuado el desarrollo de la plataforma para ofrecer las funcionalidades necesarias para establecer un diálogo entre autoridades y ciudadanos. En este sentido, puede adaptarse para informar a la población sobre programas o servicios que entregan los gobiernos para atender los problemas señalados en el mapa por los ciudadanos, así como usar la plataforma para informar a la ciudadanía sobre los lugares en que estos programas se están entregando. Así, las dependencias involucradas podrían manifestar que han oído a los ciudadanos, darles respuesta o establecer algún compromiso (Tapia-McClung, 2016a).

Ciertamente, los datos obtenidos en procesos de *crowdsourcing* pueden carecer de validez o veracidad. En este sentido, la plataforma cuenta con mecanismos de validación de la información por pares ciudadanos, como la votación en línea con iconos de agrado o desagrado, el registro de datos de observaciones de otros participantes o la inclusión de evidencias fotográficas que los confirmen o contradigan. La frecuencia de observaciones que confirman positivamente un dato representa que una observación se comparte por un mayor número de personas y permite calificar su calidad. La información en línea relevante y válida se va actualizando en tiempo real. En cualquier momento se pueden generar mapas del estado de la emergencia y su manifestación en los distintos lugares de la zona afectada (Tapia-McClung, 2016b).

En suma, esta plataforma facilita procesos de *crowdsourcing* y VGI, que de manera natural surgen como parte de las acciones de una sociedad civil que hace uso de todos los instrumentos a su alcance para dar respuesta inmediata a una emergencia causada por un sismo. La plataforma se perfila como un elemento que, siguiendo a Goodchild y Glennon (2010: 240), facilita que “la sociedad emplee los ojos y los oídos del público en general, su ansia de ayudar y su reciente empoderamiento digital, para proveer una ayuda efectiva a los primeros en responder y a los gestores de la emergencia”.

HACIA UN SERVICIO PÚBLICO DE INFORMACIÓN GEOESPACIAL PARA LA GESTIÓN DE DESASTRES

Desde distintos ámbitos científicos, tecnológicos y de gestión pública, por casi dos décadas y ciertamente desde que los sistemas de información geográfica pasaron a ser parte ubicua en la Web, se ha planteado el lugar central que las ciencias de información geoespacial ocupan en la prevención, la respuesta y la recuperación de un desastre. En México, estas ciencias y tecnologías han desarrollado un nicho relevante en la materia. En este proceso, el Sistema Nacional de Protección Civil y el Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred) han jugado un papel muy relevante. Por casi tres lustros, Cenapred se ha dado a la tarea de realizar, promover o normar la realización de atlas de riesgos de municipios y estados, que ofrecen una visión geográfica de los escenarios probables de peligro en nuestro país frente a los desastres que lo asolan y una aproximación a la exposición de la población, la infraestructura y sus vulnerabilidades. Este esfuerzo desembocó en la integración del Atlas Nacional de Riesgos, que reúne hoy información geoespacial relativa a riesgos por desastres, que está integrada en una plataforma interactiva que se puede consultar en línea. Es un gran acervo de información geoespacial que se combina con las capas de cartografía temática e imágenes de percepción remota, modelos geoespaciales realizados por investigadores en disciplinas como hidrología, climatología, sismología, geofísica o vulcanología. Es un resultado robusto de un esfuerzo de colaboración guiado por el Cenapred y acompañado por instituciones académicas y de gobierno.

No obstante su valor, el uso más frecuente del Atlas Nacional de Riesgos tiene lugar entre investigadores, funcionarios y especialistas. El ciudadano común no se informa en este Atlas sobre los riesgos a los que está expuesto. La ciudadanía no se ha apropiado del mismo. Esto sucede porque fue concebido como una herramienta para conjuntar información útil en la investigación sobre desastres y no para generar una cultura de prevención o sustentar la participación de la población en la gestión de su ciclo.

Hace ya 12 años, en CentroGeo se desarrolló una herramienta que combinaba información geoespacial de distintas fuentes y formatos, modelos de dinámicas del espacio geográfico que interactúan de distintas formas en el ciclo del desastre, y estimaciones de la distribución de grupos vulnerables en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

(Martínez-Viveros y López-Caloca, 2010). Esta herramienta proporcionaba información geoespacial relevante para quienes toman decisiones en las etapas de prevención y emergencia del ciclo de los desastres en este gran conglomerado urbano. Su diseño se apoyaba en la conceptualización de la vulnerabilidad como construcción social y como factor clave en la magnitud del mismo. La Web 2.0 y Google Maps estaban en la etapa temprana de su surgimiento, no existían aún otras plataformas abiertas de mapas digitales y no se había generalizado la portación de GPS en los dispositivos móviles. CentroGeo carecía de conectividad de Internet de banda ancha. Por las limitantes de las herramientas tecnológicas disponibles para CentroGeo en ese momento, el trabajo en colaboración con comunidades de usuarios se planteó como un proceso presencial de visualización, análisis y retroalimentación. La herramienta desarrollada en ese entonces en CentroGeo se albergaba en un disco compacto y se compilaba en una computadora de escritorio, con los problemas que esto implicaba para su difusión y distribución.

El contexto en que surgió esta herramienta ha cambiado radicalmente y la obsolescencia de la herramienta anteriormente mencionada es evidente. Hoy los usuarios de Internet en el mundo se cuentan por billones, los sitios Web por millones, los flujos de información por segundo en terabytes, y el volumen de información que fluye en tiempo real es inimaginable (USGIF, 2015: 5). El avance de las tecnologías de información y comunicación en general y el de las geotecnologías en particular han cambiado el tejido social.

En el contexto actual, los mapas digitales, además de su enorme potencial para el avance de la ciencia y del conocimiento del territorio, son parte de la vida cotidiana. Ayudan, por ejemplo, a viajar con facilidad de un lugar a otro, a ubicar establecimientos o lugares emblemáticos, o a expresar lo que se ve, se consume o se siente al estar en algún lugar. La tecnología permite que casi cualquier persona use una plataforma abierta en la Web y haga el mapa que desea ver o las relaciones espaciales que desea representar. Esta democratización del “hacer mapas” se expresa en el creciente interés y la participación de las personas en mapear lo que observan en su entorno. Las personas publican eventos y generan fenómenos colectivos que permiten identificar patrones o localizar problemas. De procesos de *crowdsourcing*, de cartografía participativa o de voluntarios surgen mapas como construcciones colectivas, validadas por multitudes y basadas en conocimiento local. Construcciones sociales que invitan a la

reflexión y se perfilan como participantes activos para encontrar formas de resolver problemas o aprovechar oportunidades.

También en el contexto actual, se cuentan por miles los satélites artificiales que orbitan la tierra, por millones las personas que portan dispositivos con GPS, por miles de millones los usuarios de redes sociales, y el desarrollo de tecnologías geoespaciales genera inteligencia para la investigación y el abordaje de problemas en una cada vez más amplia variedad de temas y lugares.

Hoy en día se cuenta con grandes bases de datos abiertos y disponibles en línea; plataformas digitales que pueden dar soporte a visualizaciones integradas con datos geoespaciales de diversas fuentes y formatos; capacidad de construir soluciones de geocomputación que permiten reconocer, extraer y representar patrones, e interfaces de consulta y análisis amigable. Aunque aún existen problemas que resolver, se ha avanzado en la creación de infraestructuras de datos y se han remontado muchos de los problemas de interoperabilidad que obstaculizan su intercambio.

Este nuevo contexto abre un espacio de oportunidad para realizar un esfuerzo renovado por acercar a la población información relevante para mejorar la resiliencia social, lo que contribuye a generar una cultura de prevención de riesgos, a una mejora en las capacidades para afrontarlos y a un aumento en la probabilidad de superarlos sin romper los equilibrios sociales, económicos y culturales. Es en este contexto que el doctor José Ignacio Chapela plantea un Servicio Público de Información que, a través de Internet, acerque a la población, de manera sencilla y transparente, la información relevante para su toma de decisiones a lo largo del ciclo del desastre, desde la prevención y la atención a la emergencia hasta la recuperación y la reconstrucción. Un servicio que promueva la construcción de un diálogo abierto entre autoridades y ciudadanos y entre los distintos sectores de la sociedad.

El planteamiento de un servicio de información ciudadana de esta naturaleza perfila un tipo de sistema de información con un nivel jerárquico que permita integrar datos de diversas fuentes y formatos para entregar información que responda a las necesidades ciudadanas y sea útil en la toma de decisiones. Este servicio representa un nivel sistémico que actuaría como centro de interacción con la sociedad a partir de entregar servicios de inteligencia que ayuden a considerar la prevención del riesgo en la decisión de la ubicación de una residencia, un negocio, un evento o un albergue, así como en la decisión de las vías y formas de movilidad cotidiana regular, incidental o extraordinaria.

Como parte de la construcción de una cultura de prevención, estos servicios de información permitirán al ciudadano conocer los niveles de vulnerabilidad a que está sujeta la colonia, manzana o predio en que habita, así como los factores que se asocian con la construcción social de estas vulnerabilidades. Este sistema de contacto con la ciudadanía sería el punto neurálgico para captar los procesos colectivos de información que surgen en las crisis que se deben afrontar en la etapa de emergencia y para devolver a la ciudadanía la inteligencia que sus procesos colectivos generan.

En la etapa de reconstrucción, las capacidades de diálogo entre gobierno y ciudadanía se tornan prioritarias; estas capacidades se potenciarían con un sistema de contacto que informara a los ciudadanos sobre los programas de reconstrucción y los recursos de que disponen, las formas para su canalización, su cobertura en tiempo y espacio, la elegibilidad de los beneficiarios, los requisitos que éstos deben cumplir y los avances en la asignación de recursos y la ejecución de las líneas de acción. Los ciudadanos podrían registrar en el sistema sus dudas, necesidades y sugerencias.

El sistema contaría con información básica que cubriera, entre otros aspectos, escenarios de riesgos, padrones de afectados y de beneficiarios de programas de reconstrucción, inventarios de daños de edificaciones e infraestructura, víctimas y lugares de atención de las mismas, centros de acopio y distribución de ayuda a la población afectada.

Algunas de las características que debe tener un sistema de esta naturaleza:

1. Tecnología de código abierto.
2. Normas de interoperabilidad.
3. Interactividad amigable y accesible.
4. Capacidad de albergar y/o gestionar el acceso en línea de bases de datos de distintas fuentes y formatos.
5. Capacidad de entregar productos de inteligencia útiles y actualizados para orientar labores de rescate y atención a víctimas.
6. Capacidad de recibir en tiempo real datos y reportes de la ciudadanía (con redes de voluntarios o procesos de *crowdsourcing*).

El desarrollo de un servicio de esta naturaleza no depende sólo de la tecnología, requiere también de voluntad política para generar una cultura de diálogo con la ciudadanía a partir de:

1. Generar acuerdos para el intercambio interoperable de datos, modelos y tecnologías geoespaciales entre las instituciones productoras de información y grupos de investigación.
2. Adoptar estándares de datos abiertos y de accesibilidad.
3. Adoptar valores de transparencia y rendición de cuentas para informar sobre la operación de los recursos destinados a la gestión de desastres.

Chapela menciona ciertos obstáculos que hay que remontar para hacer realidad un servicio de esta naturaleza, que vislumbra, por un lado, en la accesibilidad de los datos, y por otro, en el espacio de oportunidad institucional para su operación.

En relación con el primer caso, comenta la tendencia en el ámbito internacional hacia datos abiertos y los avances significativos que México ha tenido al respecto: las instituciones y los organismos productores de información han hecho un gran esfuerzo por adoptar los estándares adecuados; existe un marco legal para declarar qué es información pública, así como políticas y normas para proteger la confidencialidad de los datos personales. Pero también se observa un “carácter no público de la información pública”, que emana de las barreras que el ciudadano enfrenta para tener acceso a la información.

En este sentido, Chapela menciona tres fuentes de información que son relevantes para que la ciudadanía pueda conocer y estimar los riesgos que está dispuesta a asumir. Las tres generan información que por ley es pública, pero conseguirla implica trámites engorrosos o vías tortuosas de acceso que están envueltas en un marco de opacidad, lo que desincentiva la consulta. La primera de ellas es el registro público de la propiedad; la segunda es el catastro, y la tercera, los planes de uso del suelo. Menciona que por varios años se ha intentado vincular los catastros con el registro público, con el fin de consolidar un instrumento robusto de planeación urbana y ordenamiento territorial. Estas iniciativas han prosperado poco, no tanto por un tema de factibilidad técnica o económica, sino principalmente por el temor de autoridades municipales, e incluso de entidades federativas, de afectar los intereses económicos de las inmobiliarias.

Por su parte, la reglamentación del uso del suelo queda en el ámbito jurisdiccional de los municipios y es un determinante de la política de desarrollo urbano que, por lo general, no se abre a la deliberación pública y transparente con la ciudadanía.

Las tres fuentes de información son relevantes para que un ciudadano pueda conocer los escenarios de riesgo en la escala del espacio que habita o por el que transita cotidianamente. No basta visualizar en un mapa que cierta delegación tiene probabilidad de ser afectada por un sismo, pues esta escala de agregación de los datos puede ser de interés para un investigador o un funcionario; al ciudadano le interesan los productos de inteligencia que le permitan tomar decisiones en la escala específica del lugar.

En relación con el espacio de oportunidad institucional para la operación de un servicio de esta naturaleza, Chapela señala como ejemplo la Constitución de la Ciudad de México,⁸ que en su artículo 15 abre un espacio de oportunidad para implantar mecanismos de apertura y contacto con la ciudadanía de este tipo de información. Dicho artículo versa sobre los instrumentos de la planeación del desarrollo y plantea la creación de un instituto especializado en la materia, en un marco de participación de todos los sectores de la sociedad y desempeñando funciones transversales. Este instituto soportaría sus funciones con un sistema de información “estadística y geográfica científico, público, accesible y transparente”, con información disponible en formato abierto. Cabe señalar que, a nivel nacional, no se observan mecanismos homólogos que explícitamente planteen acercar a la población de manera accesible y transparente la información que le permita conocer los riesgos y vulnerabilidades presentes en su espacio cotidiano, conocimiento que es indispensable en la construcción de una cultura de prevención que abone a mejorar la resiliencia social.

Integrar un servicio de información ciudadana no plantea un problema de factibilidad tecnológica, sino de voluntad política. Para su construcción existen el talento, las herramientas y la tecnología. Estos párrafos sólo han delineado sus principios de diseño.

REFLEXIONES FINALES

En el dominio de conocimiento de las ciencias de la información geoespacial convergen las líneas de investigación que desde distintas perspectivas integran la agenda de proyectos que se desempeñan en el CentroGeo. En este artículo se intentó rescatar aquellos que tienen un potencial específico

⁸ En la página del *Diario Oficial de la Federación*: <http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5470989&fecha=05/02/2017> [última consulta: 5 de abril de 2018].

de contribuir a la comprensión del impacto de un sismo, a la estimación de la distribución geográfica de la vulnerabilidad social frente a desastres sísmicos o a la generación de información oportuna y georreferenciada, útil para la gestión de una emergencia.

La difusión del uso de tecnologías de información geoespacial y su aplicación en múltiples ámbitos de la vida cotidiana han cambiado las formas en que las personas se comportan y se relacionan. Con ventajas y desventajas, han incidido en la estructuración del tejido social y son parte de la vida cotidiana y parte estructurante de la misma. En este artículo se ha intentado comunicar que pueden también formar parte de la estructuración de una gestión efectiva y eficiente del ciclo del desastre en un marco de participación de todos los sectores de la sociedad.

La tecnología existe, pero debe integrarse de manera efectiva para apoyar la gestión integral del ciclo del desastre sísmico. En este sentido, resulta relevante considerar la brecha digital que se expresa en el bajo acceso a estas tecnologías por parte de la población de escasos recursos y las comunidades y regiones donde se concentran grupos sociales de bajos ingresos. Es claro que, si bien los sismos del pasado septiembre afectaron a la Ciudad de México, tuvieron efectos devastadores en comunidades de Oaxaca, Morelos o el Estado de México, lugares con grados relevantes de marginación en el acceso a tecnologías de información y comunicación, y serias limitaciones de conectividad. Es necesario ofrecer opciones adaptadas a las condiciones técnicas de equipamiento y conectividad de los grupos sociales y las comunidades marginadas, así como proveer el entrenamiento necesario para generar las habilidades que permitan a los grupos excluidos participar en el mundo digital y beneficiarse del acceso a la información que esta participación implica.

La etapa de reconstrucción tras los sismos de septiembre de 2017 sigue vigente y las autoridades señalaron que tomaría, cuando menos, cuatro años. Los grupos afectados se encuentran aún tratando de encontrar un techo y de satisfacer sus necesidades de subsistencia, de reorganizar su forma de vida o encontrar nuevas formas de continuar y adaptarse a condiciones adversas; en la mayoría de los casos, más adversas de las que ya de por sí enfrentaban. Pero esta vivencia ocurre cuando la mayoría de la población ha regresado a sus trabajos y a sus actividades cotidianas: vive en la normalidad. De la misma forma, la información y las tecnologías geoespaciales se han replegado a sus usos normales. Esto sucede porque se carece de la conciencia de que el desastre es un ciclo que no termina y que en este momento, junto con la llamada normalidad,

convergen en tiempo y espacio tanto la etapa de reconstrucción como la etapa inicial de construcción de la siguiente espiral del ciclo, en la cual la sociedad debería estar activa en la consolidación y la profundización de la cultura de prevención.

La geointeligencia tiene el potencial de contribuir a la construcción de una cultura de prevención, aporta inteligencia en la atención de la emergencia, puede dar transparencia a las acciones del proceso de reconstrucción que, en general, se despliegan en un marco de opacidad e impugnación social, y tiene el potencial de generar la inteligencia necesaria para contribuir a romper la reproducción de un ciclo en el que la vuelta a la normalidad implica el regreso a las condiciones de vulnerabilidad que prevalecían antes de que un sismo detonara un nuevo desastre.

BIBLIOGRAFÍA

- CROOKS, Andrew, Arie Croitoru, Anthony Stefanidis y Jacek Radzikowski (2013). “#Earthquake: Twitter as a Distributed Sensor System”. *Transactions in GIS* 17 (1): 124-147.
- ELWOOD, Sarah (2008). “Volunteered geographic information: future research directions motivated by critical, participatory, and feminist GIS”. *GeoJournal* 72: 173-183.
- GANEEV, Rashid (2014). *Laser-Surface Interactions*. Heidelberg: Springer.
- GARCÍA-MAGAÑA, Jesús Héctor (2015). “Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificios urbanos a partir de datos geoespaciales”. Tesis de Maestría en Geomática. México: Centro de Investigación en Geografía y Geomática “Ing. Jorge L. Tamayo” (CentroGeo).
- GOODCHILD, Michael (2007). “Citizens as sensors: The world of volunteered geography”. *GeoJournal* 69: 211-221.
- GOODCHILD, Michael, y Alan Glennon (2010). “Crowdsourcing geographic information for disaster response: a research frontier”. *International Journal of Digital Earth* 3: 231-241.
- MARTÍNEZ-VIVEROS, Elvia, y Fernando López-Caloca (2010). “A cybercartographic tool for supporting disaster prevention planning processes and emergency management in Mexico City”. En *Geospatial Techniques*

- in Urban Hazard and Disaster Analysis*, compilado por Pamela Showalter y Yongmei Lu, 255-271. Heidelberg: Springer.
- MARTÍNEZ-VIVEROS, Elvia, Rodrigo Tapia-McClung, Yezmín Calvillo-Saldaña y José Luis López-Gonzaga (2017). “Volunteered geographic information for building territorial governance in Mexico City: The case of the Roma Neighborhood”. En *Citizen Empowered Mapping*, compilado por Michael Leitner y Jamal Arsanjani, 237-260. Suiza: Springer.
- MATTIOLI, Cristiana (2014). “Crowd sourced maps: Cognitive instruments for urban planning and tools to enhance citizens’ participation”. En *Innovative Technologies in Urban Mapping*, compilado por Antonella Contin, Paolo Paolini y Rossella Salerno, 145-156. Suiza: Springer.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (2006). *Priorities for GEOINT Research at the National Geospatial Intelligence Agency*. Washington: The National Academies Press.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (2010). *New Research Directions for the National Geospatial-Intelligence Agency: Workshop Report*. Washington: The National Academies Press.
- SILVÁN-CÁRDENAS, José Luis, Jorge Montejano-Escamilla y Mauricio Cervantes-Salas (2015). “Percepción remota para la estimación de población en áreas geostatísticas básicas”. *Realidad, Datos y Espacio: Revista Internacional de Estadística y Geografía* 6 (1): 50-71.
- TAPIA-MCCLUNG, Rodrigo (2016a). “A digital platform to support citizen-government interactions from volunteered geographic information and crowdsourcing in Mexico City”. En *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, compilado por Osvaldo Gervasi, Beniamino Murgante, Sanjay Misra, Ana María Rocha, Carmelo Torre, David Taniar, BernadyApduhan y Elena Stankova, 167-182. Suiza: Springer.
- TAPIA-MCCLUNG, Rodrigo (2016b). “Collective mapping to support citizen-government interactions using a digital platform”. *GI Forum* 2: 147-156.
- THE UNITED STATES GEOSPATIAL INTELLIGENCE FOUNDATION (USGIF) (2015). “State of GEOINT Report”. Disponible en <<http://usgif.org/>>

system/uploads/3661/original/SOG_FINAL.pdf> [última consulta: 22 de marzo de 2017].

USERY, Lynn, Dalia Varanka y Michael Finn (2010). “USGS History, Part 1: 1884-1980”. En *GIS Best Practice. 125 Years of Topographic Mapping at USGS*, 4-9. Redlands: ESRI.

ZOOK, Matthew, Mark Graham, Taylor Shelton y Sean Gorman (2010). “Volunteered geographic information and crowdsourcing disaster relief: A case study of the Haitian earthquake”. *World Medical & Health Policy* 2 (2): 7-33.