

INFRAESTRUCTURA RESILIENTE: DESEMPEÑO SOSTENIDO EN UN MUNDO SIEMPRE CAMBIANTE

RESILIENT INFRASTRUCTURE: SUSTAINED PERFORMANCE IN AN EVER-CHANGING WORLD

León Francisco Gay Alanís*

Artículo recibido: 01-06-2016

Aprobado: 31-10-2016

Resumen

El funcionamiento ininterrumpido de los sistemas de infraestructura es necesario para nuestro estilo de vida actual. No obstante, los sistemas de infraestructura enfrentan riesgos crecientes que resultan del deterioro natural, interrupciones naturales y antropogénicas, demanda creciente de la población urbana, y falta de recursos. Es necesario mejorar la resiliencia de la infraestructura para asegurar una recuperación rápida y eficiente en caso de fallas. Aunque la resiliencia de la infraestructura es un concepto de difícil cuantificación, hay pasos específicos que podemos tomar para aumentar la probabilidad de resiliencia. En otras palabras, puesto que la resiliencia de la infraestructura es un resultado probabilístico, no podemos asegurar de antemano que un sistema es resiliente, pero sí podemos aumentar su probabilidad de resiliencia. Varios indicadores y marcos de referencia han sido propuestos para evaluar la resiliencia de la infraestructura. El artículo explica qué es infraestructura resiliente, presenta la historia del concepto de resiliencia y enfatiza los beneficios sociales de una infraestructura resiliente, particularmente para los sectores más vulnerables de la población. Lograr el mejoramiento de las condiciones de vida de los sectores vulnerables, en cuanto a infraestructura, tiene dos aspectos principales: primero, la infraestructura debe tener una cobertura suficiente, con un nivel de servicio aceptable. Segundo, la infraestructura debe ser resiliente y confiable.

*Académico-investigador de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Guanajuato, México; Doctor en Ciencias león.gayal@gmail.com

Cuando los sistemas de infraestructura fallan, los sectores desfavorecidos son los que más sufren. Si los servicios de infraestructura pueden ser sostenidos y rápidamente recuperados, los sectores vulnerables tendrán menos impactos negativos de la materialización de riesgos.

Abstract

The continuous functionality of infrastructure systems enables our current societal standard of living. However, infrastructure systems face increasing threats derived from natural deterioration, natural and anthropogenic disruptions, increasing population demand, and lack of funding. It is necessary to address infrastructure resilience in order to ensure a fast and cost-effective recovery in case infrastructure fails. Although the resilience of infrastructure systems has proven difficult to measure, there are specific steps we can take to increase the probability of such a resilient response. In other words, since infrastructure system resilience is a probabilistic outcome, we cannot claim any infrastructure is resilient *a priori* but we can improve the probability of resilience. Several frameworks and metrics have been proposed for assessing resilient infrastructure. The paper explains what is resilient infrastructure, presents the historical evolution of the concept of resilience, and emphasizes the societal benefits of achieving resilient infrastructure, particularly for the most vulnerable population sectors. Achieving improvement of living conditions of the poor, in terms of infrastructure, is a two pronged approach: First, infrastructure coverage with an adequate level of service has to be extended to everyone; and second, infrastructure function has to be resilient and reliable. When infrastructure systems fail, often times people with the less economic resources suffer the most. If infrastructure services can be sustained and rapidly restored, the vulnerable population sectors will have less negative impacts from unforeseen events.

Palabras clave: Resiliencia, proceso estocástico, infraestructura, nivel de servicio.

Keywords: Resilience, stochastic process, infrastructure, level of service.

Introducción

El correcto funcionamiento de los sistemas de infraestructura tales como caminos, sistemas de agua potable, drenajes pluvial y sanitario, generación y distribución de energía eléctrica, y comunicaciones, entre otros, es fundamental para lograr la calidad de vida de la sociedad actual. Muchos de estos sistemas son considerados críticos. Los sistemas críticos de infraestructura se definen como aquellos sistemas físicos o virtuales, servicios y activos que son vitales para el bienestar de la sociedad y cuya interrupción tiene impactos significativos sobre la salud, seguridad o bienestar de los ciudadanos y el funcionamiento efectivo del gobierno (Rinaldi, 2004).

Por ejemplo, un buen sistema de distribución de agua potable hace que no haya necesidad de caminar diariamente cargando cubetas de agua

Los sistemas de infraestructura proveen servicios esenciales y, cuando funcionan bien, eliminan la necesidad de dedicar tiempo y esfuerzo a satisfacer necesidades básicas. Por ejemplo, un buen sistema de distribución de agua potable hace que no haya necesidad de caminar diariamente cargando cubetas de agua.

Con el paso del tiempo, estos sistemas empezarán a fallar si no tienen mantenimiento regular, lo cual les permite alcanzar su vida útil esperada

Precisamente porque el funcionamiento de los sistemas de infraestructura nos permite enfocarnos en otras actividades, tendemos a ignorar dichos sistemas, particularmente cuando funcionan bien (se vuelven “invisibles”). Un sistema de infraestructura que presenta fallas se hace notar rápidamente. El funcionamiento de los sistemas de infraestructura se mide en términos de su nivel de servicio. El nivel de servicio de un sistema de infraestructura está compuesto por indicadores de cantidad y calidad, de manera que si la infraestructura provee un servicio de calidad en la cantidad adecuada, decimos que tiene un nivel de servicio adecuado.

El nivel de servicio de un sistema de infraestructura es un concepto fundamental. Nos permite medir cuán bien desempeña su función, así como identificar áreas que deben mejorar. El nivel de servicio de la infraestructura es sostenido mediante una planeación y mantenimiento adecuados. Por esta razón, la falta de financiamiento para infraestructura es un riesgo.

Para que estos sistemas tengan un buen nivel de servicio requieren de atención constante: En primer lugar, todos los sistemas de infraestructura están sujetos a deterioro natural; con el paso del tiempo, estos sistemas empezarán a fallar si no tienen mantenimiento regular, lo cual les permite alcanzar su vida útil esperada. En segundo lugar, el funcionamiento de la infraestructura puede ser afectado además por eventos disruptivos naturales o antropogénicos, tales como accidentes, ataques deliberados, huracanes o sismos. Los efectos de estos eventos se contrarrestan con reparación y reemplazo de secciones del sistema.

El 12 de enero de 2010, un terremoto de magnitud 7.0 Mw (escala de magnitud de momento) sacudió Haití, con un epicentro a 15 km de Puerto Príncipe. En los edificios derrumbados, se estima que hubo 316,000 muertos, 350,000 heridos, y 1.5 millones de personas perdieron su hogar. Varios sistemas de infraestructura colapsaron: El muelle de Puerto Príncipe sufrió daños severos, el aeropuerto no podía funcionar porque la torre de control se cayó y no había combustible para los aviones, y muchas de las calles de la red vial estaban obstruidas por escombros. Se estimó que la reconstrucción podría llevar una década (“Terremoto de Haití de 2010”, 2016). Unas semanas después, el 27 de febrero de 2010, un terremoto de magnitud 8.8 Mw afectó a Chile. Este sismo dejó un saldo de 525 muertos, y 500 mil viviendas con daño severo. Este sismo

En los edificios derrumbados, se estima que hubo 316,000 muertos, 350,000 heridos, y 1.5 millones de personas perdieron su hogar

liberó cerca de 178 veces la energía del sismo de semanas antes en Haití (“Terremoto de Chile de 2010”, 2016).

Es interesante observar cómo un evento sísmico considerablemente más intenso en Chile causó significativamente menos daño que en Haití. Además de sufrir relativamente pocos daños, Chile se ha recuperado más rápidamente que Haití. ¿A qué se debe que mientras algunas comunidades pueden recuperarse con celeridad y sufrir daños limitados, otras sufren daños mucho mayores y se recuperan lentamente? La respuesta es el grado de resiliencia que tienen.

Resiliencia

Históricamente, el término resiliencia se utilizó primero en mecánica de materiales. El módulo de resiliencia (o simplemente resiliencia) de un material es la cantidad de energía elástica que el material puede absorber, evidentemente sin sufrir deformaciones permanentes. El módulo de resiliencia se calcula como el área bajo el rango elástico de la curva esfuerzo–deformación unitaria de un material. Posteriormente, el concepto de resiliencia empezó a utilizarse metafóricamente en psicología para representar la capacidad humana de recuperarse de eventos traumáticos. El estudio de la resiliencia psicológica empezó a estudiarse después de la segunda guerra mundial. Otro paso muy importante fue el uso del concepto de resiliencia por Holling (1973) para ilustrar la capacidad de un ecosistema para alcanzar un nuevo equilibrio después de sufrir alteraciones significativas. Por lo tanto, metafóricamente el concepto de resiliencia implica la capacidad de un sistema de recuperarse después de haber estado sometido a estrés.

En infraestructura, la resiliencia se refiere a la capacidad de un sistema para soportar eventos extraordinarios (eventos disruptivos naturales y antropogénicos) que causan que al menos una parte del sistema falle. La resiliencia se manifiesta en la infraestructura cuando ésta mantiene un nivel mínimo de funcionalidad ante una situación adversa y se recupera en un tiempo corto y con un costo razonable. Así, un sistema de infraestructura resiliente no necesariamente se colapsa totalmente ante un evento disruptivo, sino que mantiene cierta funcionalidad, puede contribuir a que la comunidad se recupere y el funcionamiento normal se restablece en un lapso de tiempo aceptable.

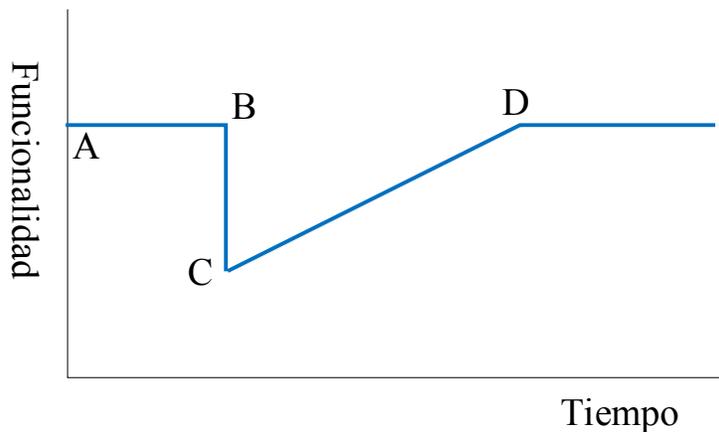
La necesidad de que la infraestructura sea resiliente resulta de varios factores: La sociedad actual es predominantemente urbana (U.N., 2012), y puesto que los centros urbanos son concentraciones de infraestructura, ésta debe funcionar continuamente para soportar a sus habitantes. Ya que la proporción de población mundial en centros urbanos está creciendo, la demanda de servicios de infraestructura aumenta. Además, se ha observado un aumento en la frecuencia de eventos climáticos extremos como sequías, inundaciones y huracanes, como resultado del cambio climático;

Es interesante observar cómo un evento sísmico considerablemente más intenso en Chile causó significativamente menos daño que en Haití

El módulo de resiliencia se calcula como el área bajo el rango elástico de la curva esfuerzo–deformación unitaria de un material

sin mencionar los riesgos antropogénicos tales como vandalismo, accidentes, sabotaje, y terrorismo. Todos estos eventos pueden afectar severamente el funcionamiento de la infraestructura. Finalmente, muchos de los sistemas de infraestructura son geográficamente extensos y es prácticamente imposible proteger cada punto del sistema. Ante esta imposibilidad, una alternativa es que el sistema esté preparado para resistir interrupciones y recuperarse rápidamente.

Un reto importante en la actualidad es cómo medir la resiliencia de un sistema de infraestructura. Uno de los primeros intentos fue a través de una curva de funcionalidad, mostrada en la figura 1.



Ante esta imposibilidad, una alternativa es que el sistema esté preparado para resistir interrupciones y recuperarse rápidamente.

Figura 1. Curva de funcionalidad

La curva de funcionalidad empieza con el funcionamiento normal de la infraestructura, antes de que ocurra un evento disruptivo, en el punto A. Cuando el evento ocurre (punto B), la funcionalidad cae a un mínimo (punto C), y desde ahí empieza a recuperarse dicha funcionalidad, hasta alcanzar el nivel de servicio anterior, indicado por el punto D. (O'Rourke, 2007).

Junto con la curva de funcionalidad, se propusieron cuatro características de los sistemas resilientes, llamadas las cuatro "R" o simplemente 4R: Resistencia, Redundancia, Recursos, y Rapidez

La curva de funcionalidad ilustra el concepto de resiliencia, pero omite algunos conceptos importantes. Observando la figura 1, podemos notar que la resiliencia así medida se basa únicamente en el tiempo de recuperación de la funcionalidad. Cuanto menos caiga la funcionalidad y más rápido se recupere el nivel original, más resiliente es el sistema. Sin embargo, se ignoran otras consideraciones, tales como el costo asociado con la recuperación.

Junto con la curva de funcionalidad, se propusieron cuatro características de los sistemas resilientes, llamadas las cuatro "R" o simplemente 4R: Resistencia, Redundancia, Recursos, y Rapidez (Bruneau et al., 2003).

Resistencia (Robustness): La capacidad de un sistema de no colapsarse totalmente ante una falla, sino conservar un mínimo

Puesto que los sistemas de infraestructura no operan aisladamente, estas características de un sistema resiliente son afectadas por las interdependencias con otras infraestructuras

necesario de funcionamiento. En la figura 1, la resistencia se representa como la ordenada del punto C.

Redundancia (Redundancy): Que el sistema tenga suficientes redundancias, para evitar que haya cuellos de botella o elementos que al fallar causen la falla completa del sistema. La redundancia no aparece explícitamente en la figura 1.

Recursos (Resourcefulness): Se refiere no únicamente a tener recursos para atender una emergencia, tales como repuestos y personal, sino también al ingenio para improvisar soluciones temporales que sostengan el funcionamiento del sistema. No se muestra explícitamente en la figura 1.

Rapidez (Rapidity): La tasa a la cual se recupera la funcionalidad del sistema, representada como la pendiente media de la recuperación en la figura 1, i.e. la pendiente del tramo CD.

Puesto que los sistemas de infraestructura no operan aisladamente, estas características de un sistema resiliente son afectadas por las interdependencias con otras infraestructuras. Por ejemplo, para arreglar una estación de bombeo después de un evento de falla, digamos un sismo, es necesario tener un camino de acceso al lugar. Si la infraestructura vial no está funcionando, tampoco el sistema de distribución de agua podrá repararse.

Después de que se desarrolló la curva de funcionalidad, se integró la consideración del costo de una falla en la infraestructura. Por ejemplo, de dos sistemas de infraestructura que presentan una falla similar y se recuperan al mismo tiempo, aquel que tiene menor costo de recuperación se considera más resiliente. Esto se ilustra en la Figura 2 (Vugrin et al., 2010).

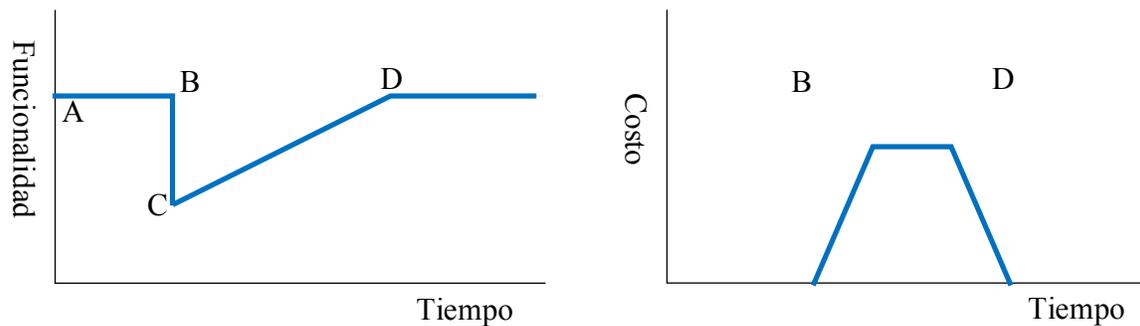


Figura 2. Resiliencia considerando costo de recuperación

En la figura 2, la curva de la izquierda es la conocida curva de funcionalidad. El diagrama de la derecha representa los costos en los que se ha de incurrir para recuperar la funcionalidad perdida. Se invierte desde que falla la infraestructura (B) hasta que se logra la recuperación (C). Un sistema más resiliente requiere menor inversión para recuperarse que un sistema menos resiliente.

Desarrollar métodos de evaluación de resiliencia ha resultado ser un reto significativo. La resiliencia de un sistema construido, como la infraestructura, depende de una variedad de factores externos y es un fenómeno complejo. El hecho de que un sistema de infraestructura sea o no resiliente depende de factores como su estado de conservación, redundancias, capacidad de respuesta de las autoridades, preparación para emergencias, interdependencias y la magnitud del evento de falla. La resiliencia de un sistema de infraestructura no se conoce con precisión sino *a posteriori*. Todo lo que podemos evaluar *a priori* en términos de resiliencia, son probabilidades resultado de un proceso estocástico. Sólo cuando el evento ocurre realmente sabemos si un sistema era efectivamente resiliente (Gay y Sinha, 2013). A pesar de esto, sí podemos aumentar *a priori* la probabilidad de que un sistema de infraestructura sea resiliente.

Infraestructura resiliente

La infraestructura resiliente no es aquella que nunca falla. Más bien es la que, habiendo sufrido un evento de falla causado natural o antropogénicamente, es capaz de sostener un nivel mínimo de servicio y recuperar su funcionamiento original con tiempo y costo razonables.

El que la infraestructura sea resiliente tiene beneficios adicionales. Se ha encontrado que los sistemas resilientes tienden a ser más sustentables, aunque esto no es necesariamente cierto en el corto y mediano plazos. Además, el mantener una alta probabilidad de resiliencia en un sistema, obliga a administrarlo más eficientemente y mantenerlo en mejor estado de conservación.

Hay varias maneras de aumentar la resiliencia de una sistema de infraestructura. La primera y más obvia es mejorar sus características en términos de las cuatro “R”: Resistencia, Redundancia, Recursos, y Rapidez. A continuación tenemos algunas ideas de cómo se pueden mejorar cada una: Resistencia. El sistema debe estar en buenas condiciones de operación, sin deterioro importante. El funcionamiento debe ser capaz de resistir variaciones en los suministros de otras infraestructuras. Ayuda a la resistencia el tener un sistema organizado en módulos o “clusters”, en vez de un sistema centralizado.

Redundancia. El sistema no debe depender de un solo elemento durante el proceso. Debe haber espacio para sacar de comisión algunos elementos temporalmente sin detener la operación, mediante redundancias. Sin embargo, debe haber un equilibrio entre redundancia y economía, ya que un sistema muy redundante será más costoso.

Recursos. Debe haber repuestos cerca, dinero para emergencias, un plan de emergencia, y personal suficiente para estos casos. También es importante considerar situaciones improbables, así como situaciones no previstas en los planes de emergencia.

Se ha encontrado que los sistemas resilientes tienden a ser más sustentables, aunque esto no es necesariamente cierto en el corto y mediano plazos

Rapidez. Tener claro lo que hay que hacer para recuperar el funcionamiento lo más rápidamente posible. Hay que considerar también las interdependencias con otros sistemas de infraestructura y procurar que éstos también sean resilientes. La rapidez de recuperación depende de forma significativa de las tres características anteriores.

Un ejemplo aclarará algunos de los conceptos expuestos: Consideremos el sistema de agua potable de una población llamada Ciudad. Supongamos que el sistema funciona normalmente, cuando ocurre un sismo y se generan fracturas en varios puntos del sistema de distribución. El funcionamiento normal representa un nivel de servicio en términos de calidad y cantidad: El nivel de servicio se considera adecuado debido a que hay agua para todos (digamos 300 m³/día), y el agua es de calidad aceptable. Estas condiciones están representadas por el tramo AB en la figura 1.

Después del sismo en Ciudad, la presión en el sistema baja debido a las fracturas en las tuberías. Las estaciones de bombeo dejan de funcionar porque hay daños al sistema eléctrico de Ciudad. La cantidad de agua disponible baja, por ejemplo a 150 m³/día. La calidad del agua disminuye porque algunas partículas de suelo entran al sistema. Esta situación está representada por el punto C en la figura 1. El tramo BC es la caída en la funcionalidad del sistema (de 300 a 150 m³ por día) debida al sismo, y a los efectos del sismo en otras infraestructuras (como la red eléctrica).

Cuando el sismo ha pasado, se movilizan recursos para reparar los daños y devolver el sistema a que sea capaz de entregar 300 m³/día de agua de buena calidad. Esta recuperación (tramo CD en la figura 1) llevará tiempo y una cantidad dada de recursos. Para lograr la recuperación completa, es necesario reparar no solamente el sistema de agua potable, sino también sistemas interdependientes como la energía eléctrica.

¿Cómo sabemos si es probable que el sistema de agua de Ciudad sea resiliente? Para empezar, hay que definir cómo sería “resiliente”. Se propone (Gay and Sinha 2013) que un sistema se define resiliente si es posible recuperar su función dentro de un plazo conveniente y bajo un presupuesto establecido.

En cuanto al costo de recuperación aceptable, depende de los recursos de Ciudad. Si existe un presupuesto de contingencias de, digamos, 10 millones de pesos, el sistema será resiliente si reparar el sistema cuesta eso o menos. Por otro lado, el tiempo de recuperación también es importante. Usualmente existen varios tiempos aceptables de recuperación. Por ejemplo, una casa podría, en teoría, soportar más tiempo sin agua (digamos una semana), que un hospital (dos días). Los pobladores con recursos comprarán pipas de agua mientras se recupera el sistema. Las clases desfavorecidas tal vez no tengan esta opción.

En resumen, en este ejemplo el sistema de agua será resiliente si puede repararse en menos de dos días con un máximo de 10 millones de pesos. Cuanto más se alejen el tiempo y costo de recuperación de estos objetivos, menos resiliente es el sistema. Dependiendo de las condiciones

Para lograr la recuperación completa, es necesario reparar no solamente el sistema de agua potable, sino también sistemas interdependientes como la energía eléctrica

del sistema de agua de Ciudad, previas al sismo, la probabilidad de que tal sistema sea resiliente será mayor o menor.

En el caso de los ejemplos de Haití y Chile, la infraestructura chilena muestra un mayor grado de resiliencia. Posiblemente se debe a una combinación de factores como reglamentos de construcción más estrictos, mejor estado de conservación de la infraestructura y mayores recursos para actividades de mantenimiento, reparación, rehabilitación, y reemplazo.

Conclusión

Puesto que los sistemas de infraestructura son necesarios para sostener y mejorar la calidad de vida actual, es necesario que sean más resilientes. Lograr esto no implica necesariamente mayor inversión de recursos públicos, es posible empezar con una aplicación más eficiente de los mismos, con el claro objetivo de aumentar su resiliencia. Las inversiones públicas y privadas en actividades de mantenimiento, rehabilitación, reparación y reemplazo de infraestructura tienen beneficios económicos públicos significativos.

La infraestructura resiliente beneficia principalmente a los sectores más vulnerables de la población. Esta población depende casi totalmente del funcionamiento de estos sistemas, al no tener la opción de pagar alternativas más costosas. Por otro lado, la población de menores ingresos tiende a establecerse en zonas de riesgo, puesto que son más baratas o simplemente ilegales; lo cual aumenta su exposición a riesgos. Los riesgos en cada lugar pueden, en general, mitigarse mediante sistemas de infraestructura resiliente.

Incrementar la resiliencia de nuestra infraestructura tiene también beneficios adicionales en términos de nivel de servicio, sustentabilidad, y confiabilidad. Por ejemplo, lograr una infraestructura resiliente requiere de una mejor administración de los recursos públicos, así como asegurar acceso los servicios a toda la población; particularmente a los menos favorecidos.

Los pobladores con recursos comprarán pipas de agua mientras se recupera el sistema. Las clases desfavorecidas tal vez no tengan esta opción

Esta población depende casi totalmente del funcionamiento de estos sistemas, al no tener la opción de pagar alternativas más costosas

Referencias

Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallace, W. A., and von Winterfeldt, D. (2003). "A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities." *Earthquake Spectra*, 19.

Gay, L., and Sinha, S. (2013). "Stochastic Simulation Methodology for Resilience Assessment of Water Distribution Networks." *International Journal of Critical Infrastructures*, 10(2), 134–150.

Holling, C. S. (1973). "Resilience and stability of ecological systems." *Annual review of ecology and systematics*, 4, 1–23.

O'Rourke, T. D. (2007). "Critical Infrastructure, Interdependencies, and Resilience." *The Bridge*, 37.

Rinaldi, S. M. (2004). "Modeling and Simulating Critical Infrastructures and Their Interdependencies." *37th Hawaii International Conference on System Sciences*, IEEE.

"Terremoto de Chile de 2010." (2016). *Wikipedia, la enciclopedia libre*.

"Terremoto de Haití de 2010." (2016). *Wikipedia, la enciclopedia libre*.

U.N. (2012). *Resilient People, Resilient Planet. A future worth choosing (Overview)*. U.N. High Level Panel on Global Sustainability, New York.

Vugrin, E. D., Warren, D. E., and Ehlen, M. A. (2010). "A resilience assessment framework for infrastructure and economic systems: Quantitative and qualitative resilience analysis of petrochemical supply chains to a hurricane." *25th International Conference of the Center for Chemical Process Safety 2010 - 2010 AIChE Spring Meeting and 6th Global Conference on Process Safety, March 21, 2010 - March 25, 2010*, 25th International Conference of the Center for Chemical Process Safety 2010 - Topical Conference at the 2010 AIChE Spring Meeting and 6th Global Conference on Process Safety, American Institute of Chemical Engineers, San Antonio, TX, United states, 181–199.