

Fecha de recepción:

Fecha de aprobación:

Resumen

Los deslizamientos de tierra generados por lluvia o sismo son una de las principales amenazas para la infraestructura de transportes y las líneas vitales. Debido al desarrollo progresivo de zonas urbanas e infraestructura en lugares antes no ocupados, cada vez más personas y actividades se asientan en ambientes que están, o pueden estar, expuestas a este tipo de amenazas. Por lo anterior, en la actualidad se les está dando mayor atención a las amenazas geológicas en el contexto de la prevención y gestión de desastres. Debido al aumento de la vulnerabilidad de la infraestructura a las amenazas naturales, la demanda por sistemas de alerta temprana y monitoreo se está incrementando, siendo estos una herramienta más para prevenir desastres y mitigar el riesgo de la población.

Palabras clave: sistemas, alerta temprana, monitoreo, deslizamientos

Abstract

Landslides caused by rain or earthquakes are one of the main hazards to transport infrastructure and lifelines. Due to the progressive urban and infrastructure development in areas not previously occupied, more and more people and activities are being exposed to such hazards. Therefore, more attention is being given to geological hazards in the context of prevention and disaster management. The increased vulnerability of the infrastructure to natural hazards has produced and increasing demand for early warning and monitoring systems, being these tools to prevent disasters and mitigate the risk of the population.

Key words: systems, early warning, monitoring, landslides

Introducción

Debido al desarrollo progresivo de zonas urbanas e infraestructura en lugares antes no ocupados, cada vez más personas y actividades se asientan en ambientes que están, o pueden estar, expuestas a diferentes tipos de amenazas naturales. Este comportamiento ha hecho que la sociedad, para poder trasladarse de un lugar a otro, dependa del buen funcionamiento de la infraestructura vial y de los servicios de transporte. De acuerdo con el Banco Mundial (2005) “el 77,9% de la población de Costa Rica y el 80,1% del PIB del país se encuentran en zonas donde el riesgo de múltiples

desastres naturales es alto”. Aparte de los factores socio-económicos, las condiciones climáticas extremas, agravadas por el cambio climático, emergen como un agente condicionante de ese buen funcionamiento de la infraestructura vial y del transporte. Un ejemplo es el incremento de la vulnerabilidad de la infraestructura de transportes y de líneas vitales, las cuales por su naturaleza, muchas veces atraviesan zonas que representan una alta amenaza para ellas.

Por lo anterior, en la actualidad se les está dando mayor atención a las amenazas geológicas en el contexto del cambio climático y de proyectos sostenibles, pero sobre todo en el contexto de la prevención y gestión de desastres. Las amenazas geológicas, como los deslizamientos de suelo y roca inducidos por sismo y lluvia, son un ejemplo de esto. Por ello, existe la necesidad de mejorar el conocimiento básico de los riesgos técnicos, financieros y sociales que representan las amenazas geológicas. Debido al aumento de la vulnerabilidad de la población y la infraestructura a las amenazas naturales, la demanda por sistemas de alerta temprana y monitoreo se está incrementando, siendo estos una herramienta más para prevenir desastres y mitigar el riesgo de la población.

Por esta razón, las tecnologías para el monitoreo y la predicción de amenazas geológicas para alerta y reacción temprana se han convertido en un área de investigación (a nivel académico) y de aplicación (a nivel público y privado) muy importante, a tal nivel que fueron escogidos, como los dos temas más importantes del Reporte Mundial de Desastres de 2009 de la Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja (IFRC, 2009).

Con este artículo se pretende introducir el tema de sistemas de alerta temprana para el monitoreo de deslizamientos debidos a lluvia y sismo, como una herramienta para la prevención de desastres asociados a deslizamientos en carreteras, los cuales pueden ser

extrapolados y adaptados a cualquier otro sistema de líneas vitales que así lo requiera.

Sistemas de alerta temprana

Los sistemas de alerta temprana se definen como sistemas o medios que permiten recopilar y administrar información acerca de un posible desastre (e.g., deslizamiento), comunicar la información de forma oportuna y eficiente a los interesados para facilitar la toma de decisiones (e.g., por parte del Estado) y alertar de forma oportuna a la población (e.g., usuarios de una carretera) del peligro. La Figura 1 muestra un esquema de los aspectos operacionales de un sistema de alerta temprana.

Los sistemas de alerta pueden ser, en su organización, tan simples o complejos como se quiera, no obstante todos deberían contar como mínimo con tres componentes básicos:

1. Un sistema de instrumentación (para el caso de deslizamientos, uno adaptado para deslizamientos disparados por lluvia o sismo, o ambos).
2. Un sistema informático que reciba la información y permita su análisis.
3. Un sistema de alarma que avise del peligro inminente (deslizamiento).

La instrumentación para taludes, tanto para el monitoreo de deslizamientos disparados por lluvia como por sismo, es muy amplia y variada, por lo que no se explicará en este artículo; sin embargo, se recomienda al lector revisar las referencias 8 y 9, donde se explica con detalle los equipos disponibles, cómo funcionan y sus aplicaciones.

Sistemas de alerta temprana para deslizamientos disparados por lluvia

La asociación entre lluvias y deslizamientos es evidente, no obstante, pocas veces se estudian las razones de fondo del por qué se dan los deslizamientos. La época de mayor frecuencia de deslizamientos disparados por lluvia, para Costa Rica, es entre los meses de setiembre y octubre (cerca del fin de la época lluviosa cuando los suelos se encuentran saturados), teniendo estos periodos de recurrencia de entre dos a tres años, aunque es de esperar que con el cambio climático este periodo pueda verse acortado.



Para establecer un sistema de alerta temprana para deslizamientos disparados por lluvia es imprescindible entender, entre otros, el mecanismo de inestabilidad que produce el agua en una masa de suelo o roca, las variables que afectan el flujo del agua en dicha masa y el efecto del agua en la inestabilidad del terreno, así como tomar en consideración otros factores como los hidrogeológicos, topográficos y de cobertura vegetal.

Sobre este último aspecto Vargas (2002) menciona que “la saturación del suelo disminuye la resistencia cortante de fricción, debido a la reducción de la fuerza normal en la superficie de falla, producto de la presión de poros. La saturación del suelo también destruye la cohesión aparente, o puede reducir también la resistencia seca de un suelo cohesivo.” Continúa Vargas mencionando que “muchos taludes se saturan durante periodos de lluvia intensa, con lo que el nivel freático se eleva hacia la superficie del terreno, y el agua fluye casi paralela a la dirección del talud. Bajo estas circunstancias, se produce una fuerza de infiltración que actúa como una fuerza desestabilizadora en la masa de suelo, por lo que reduce de manera importante la estabilidad del talud.”

Harp (2002; en Vargas, 2002) indica que “para establecer un sistema de alerta que depende de criterios lluvia/deslizamiento, la ocurrencia de deslizamientos tiene que ser correlacionada con la duración/intensidad de lluvias. Por lo tanto, es importante recopilar todos los registros de lluvia que se encuentran disponibles dentro del área de interés cada vez que hay una tormenta que

active deslizamientos. También es de ayuda contar con reportes de testigos en lo que se refiere al tiempo de ocurrencia de los deslizamientos, para que la lluvia horaria pueda ser comparada con las ocurrencias, si se dispone de pluviógrafos con registro horario. Toma una cierta cantidad de eventos para construir una relación estadística válida entre lluvia e inicio de deslizamientos. Si existen instrumentos instalados para medir presiones de poro o nivel de agua, esta información puede ayudar mucho en el desarrollo de criterios lluvia/deslizamiento y por ende, en la predicción de ocurrencia de deslizamientos.”

Sistemas de alerta temprana para deslizamientos disparados por sismos

Los sistemas de alerta temprana para deslizamientos disparados por sismo, son un enfoque relativamente nuevo para la reducción de riesgo sísmico. Estos sistemas proveen, entre otros, una estimación rápida de parámetros sísmicos (tales como magnitud y ubicación), basados en los primeros segundos de información registrada cerca del epicentro. Esta información puede ser utilizada para predecir parámetros de movimiento del terreno de interés ingenieril, incluyendo aceleración pico del terreno y aceleración espectral. Sistemas de alerta temprana para sismos están actualmente en operación en países como México, Japón, Rumania, Taiwán y Turquía.

La tecnología para sistemas de alerta temprana para sismo son más desafiantes de desarrollar que para otras amenazas naturales, porque los tiempos de alerta muchas veces varían desde unos pocos segundos, en áreas cercanas a la ruptura de la falla, a minutos en zonas más alejadas, por lo que los sistemas de alerta

temprana deberían ser diseñados a un nivel local, adaptándolos a cada proyecto particular.

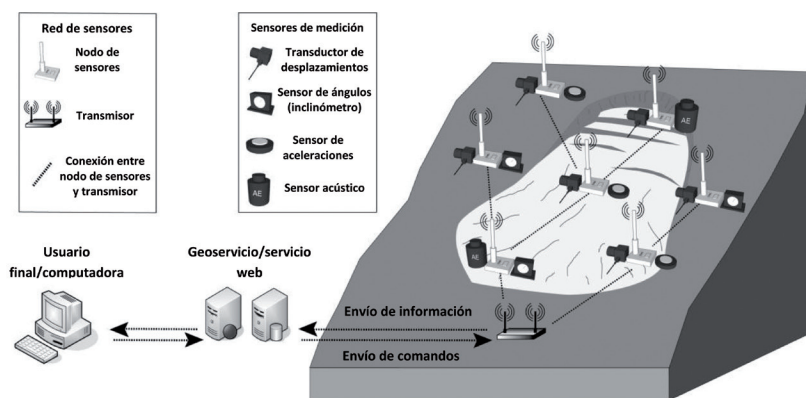
En las últimas dos décadas, a nivel internacional, se han puesto en operación una gran cantidad de sistemas de alerta temprana, los cuales han sido aplicados para propósitos civiles e industriales. No obstante, los aplicados para el monitoreo de deslizamientos disparados por sismos han sido poco desarrollados; aunque por el incremento de la vulnerabilidad de la infraestructura de transporte, como las carreteras y líneas férreas, a amenazas naturales como los sismos y deslizamientos y los problemas asociados para la sociedad los requerimientos de sistemas de alerta temprana y monitoreo va en aumento. Los sistemas que funcionan en tiempo real para la detección de la amenaza, la alerta rápida y respuesta pronta son de especial relevancia para la protección de los seres humanos y la infraestructura en función de la gestión de amenazas. Aún cuando los ambientes en que los sistemas deben operar son frecuentemente inhóspitos para la tecnología, los sistemas deben lidiar con estas dificultades; por tanto, es razonable el usar instrumentos robustos y auto sostenibles (e.g., autosuficientes en cuanto a energía) para que puedan operar antes, durante y después del evento. Para poder realizar esto es necesario el uso de la tecnología disponible, que permita operar los instrumentos de forma independiente, proveyendo información en tiempo real de forma inalámbrica (Figura 2).

Uso de tecnología en los sistemas de alerta temprana

La tecnología para los componentes de un sistema de alerta temprana (e.g., instrumentación, procesamiento de datos, comunicación de la alerta) es muy variada y no debería ser el factor limitante para su desarrollo. La dificultad del uso de tecnología en estos sistemas puede recaer más bien en aspectos prácticos, tales como el acceso a lugares para ubicar la instrumentación y para su mantenimiento. Otro aspecto a considerar es el clima (e.g., vientos fuertes, temperaturas extremas, lluvias extremas), el cual puede afectar los sensores y las líneas de comunicación, dañar cables o instrumentos y reflectores de radares. No obstante, esto debería estar considerado en un programa de mantenimiento y revisión periódica del sistema, por lo que tampoco debería ser una limitante.

Figura 2

Configuración de un sistema de alerta temprano y monitoreo para deslizamientos disparados por sismo. Adaptada de Azzam et al., 2011



Sistema	Ventajas	Desventajas
Telefonía modem e internet	<ul style="list-style-type: none"> • Sistemas confiables de bajo consumo de energía • Permite la transmisión de datos a largas distancias • Permite la comunicación bidireccional entre la estación de campo y la estación base 	<ul style="list-style-type: none"> • Son de disponibilidad limitada en algunas localidades rurales o remotas • Pueden presentar interrupciones en la transmisión de datos por daños en la línea causadas por lluvia, clima severo, inundaciones, entre otros
Radio Modem (UHF/VHF)	<ul style="list-style-type: none"> • Permite la transmisión de datos desde localidades remotas • Sistema confiable • Permite la comunicación bidireccional entre la estación de campo y la estación base 	<ul style="list-style-type: none"> • Su rango de transmisión de datos, es de ± 40 kilómetros sin estación repetidora • Son de alto consumo de energía • Requieren de equipo complementario para su funcionamiento • Son de alto costo • Deben cumplir con regulación legal para su funcionamiento
Telefonía celular	<ul style="list-style-type: none"> • Permite la transmisión de datos desde localidades remotas • Sistema confiable • Permite la transmisión de datos a largas distancias • Permite la comunicación bidireccional entre la estación de campo y la estación base 	<ul style="list-style-type: none"> • Su alcance está restringida a zonas con cobertura celular • La señal puede incluir ruido que afecte la transmisión de datos • Son de alto consumo de energía
Satélite	<ul style="list-style-type: none"> • Permite la transmisión de datos desde localidades remotas • Sistema confiable • Permite la transmisión de datos a largas distancias 	<ul style="list-style-type: none"> • La transmisión de datos está restringido a ciertos intervalos de tiempo • Existen restricciones con respecto al tipo de dato que se transmite • Permiten solamente comunicación unidireccional entre la estación de campo y la estación base • Son de alto costo
Espectros de dispersión	<ul style="list-style-type: none"> • Permite la transmisión de datos desde localidades remotas • Bajo costo • Tiene un menor consumo de energía que otros sistemas 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiene limitaciones en las distancias en las que puede transmitir datos

Los tipos de tecnología disponible incluyen:

- Sensores ordinarios (e.g., presión, desplazamiento, temperatura).
- Sistemas de sensores (e.g., estaciones meteorológicas, estaciones topográficas, radares).
- Tecnología de comunicación (e.g., alámbrica, radio, Internet, teléfonos celulares, satélite).
- Sistemas de recolección y procesamiento de datos.
- Servicios de mensajería (e.g., sirenas, teléfono, mensajes de texto, televisión, pantallas anunciantes).

El Cuadro 1 muestra ventajas y desventajas de algunos de los sistemas telemétricos disponibles para transmisión de datos.

Sistema de alerta temprana: caso Ruta Nacional 32

En Costa Rica, existen varias propuestas de sistemas de alerta temprana, desarrolladas a diferentes niveles, para deslizamientos disparados por lluvia (Vargas, 2002) o sismo (Cordero, 2011). Vargas (2002), analizó el problema de la Ruta Nacional 32 (Carretera Braulio Carillo) y propuso un sistema de alerta para

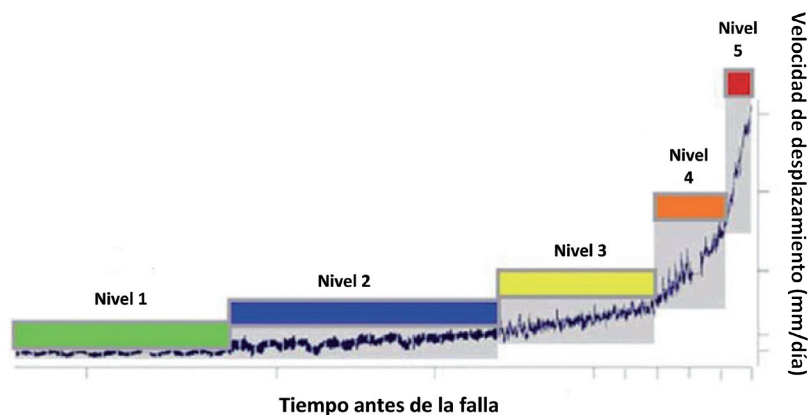
deslizamientos disparados por lluvia. En su trabajo Vargas (2002) menciona que la Ruta Nacional 32 se caracteriza por:

- Los deslizamientos ocurren casi aleatoriamente a lo largo del tramo de carretera.
- No existe población fija amenazada, sino que la amenaza recae sobre una población flotante de conductores que circulan por la carretera.
- Los deslizamientos constituyen amenazas directas.
- La carretera es una obra lineal y por ende atraviesa ambientes geológicos y topográficos diversos a lo largo de su trayectoria.

Estas características son comunes de las principales rutas nacionales primarias y secundarias de Costa Rica, por lo que el estudio de lo propuesto por Vargas (2002), se considera, podría ser adaptado a otras rutas nacionales que presenten problemas constantes de estabilidad de taludes (e.g., Ruta Nacional 2, Ruta Nacional 27).

Figura 3

Niveles de alarma en función de las velocidades de desplazamiento.
Adaptada de Lacasse & Nadim, 2011.



Vargas (2002), para el caso de la Ruta Nacional 32, propone evaluar el proyecto en tres aspectos:

- 1.Marco de desarrollo.
- 2.Marco técnico operativo.
- 3.Marco financiero.

El marco de desarrollo permite justificar el proyecto, una vez se haya estudiado las características del problema y las amenazas presentes. El marco técnico operativo permite analizar los diferentes procesos que se llevaran a cabo durante la operación del sistema de alerta, así como los equipos, recurso humano y otros componentes necesarios para el funcionamiento del sistema. Por último, el estudio financiero permite realizar una estimación de las inversiones requeridas

para adquirir los equipos y el personal necesarios para operar y mantener el sistema.

Estos tres aspectos permiten plantear un diseño preliminar del sistema de alerta y definir, debidamente, todos sus componentes. Posteriormente, se evalúa los beneficios de invertir en el proyecto con el objeto de justificar una eventual fuente de financiamiento.

Sistema de alerta temprana: caso ciudades de Åknes/Tajford, Noruega

Se muestra a continuación un ejemplo del sistema de alarma y respuesta los taludes ubicados a lo largo de la carretera que comunica las ciudades noruegas de Åknes y Tajford. El sistema de alerta temprana y preparación para emergencias Åknes/Tajford fue implementado a inicios del año 2008. Como parte de este sistema se instauró un Centro de Preparación de Emergencias, el cual opera continuamente 24 horas por día, y tiene lineamientos para diferentes niveles de alerta en función de los desplazamientos observados en extensómetros ubicados en taludes.

La Figura 3 y el Cuadro 2 presentan un ejemplo de este sistema de alerta y respuesta, el cual está en constante evolución. La evaluación del nivel de alarma es realizada con base en la interpretación de todas las mediciones disponibles y su evolución en el tiempo.

Cuadro 2

Esquema de niveles de alarma y repuesta según Figura3.
Adaptado de Lacasse & Nadim, 2011.

Nivel de alarma	Actividades y alarmas	Respuesta
Nivel 1 Situación normal	Variaciones menores	Equipo técnico solamente
	Ninguna alarma	Mantenimiento técnico
Nivel 2 Alerta	Fluctuaciones estacionales importantes en uno o múltiples sensores	Incrementar frecuencia de revisión de información, comparar diferentes sensores
	Valores < límites superiores para Nivel 2	Notificar a experto geotécnico / geológico
Nivel 3 Incrementar alerta	Incrementos en la velocidad de desplazamientos observados en múltiples sensores	Revisión continua de información en oficina y en campo, presencia de geo experto en oficina
	Valores < límites superiores para Nivel 3	Informar a instituciones encargadas de atención de emergencias
Nivel 4 Alta amenaza	Incrementos en la velocidad de desplazamientos observados en múltiples sensores	Incrementar la preparación, análisis continuo de información
	Valores < límites superiores para Nivel 4	Alertar a la población para estar preparada para evacuación
Nivel 5 Situación crítica	Incremento continuo de desplazamientos en taludes	Evacuación
	Valores < límites superiores para Nivel 5	

Conclusiones

Los sistemas de alerta temprana se presentan como una herramienta para la prevención de desastres asociados a deslizamientos en carreteras, los cuales por extensión pueden ser aplicados y adaptados a cualquier otro sistema de líneas vitales y a otras amenazas hidrogeológicas. Estos permiten recopilar y administrar información acerca de un posible desastre, comunicar la información de forma oportuna y eficiente a los interesados y alertar de forma oportuna a la población del peligro. Para esto, es de vital importancia conocer cuáles son los parámetros que se quieren controlar y determinar cuáles son los mejores equipos para hacerlo.

Hoy en día, la tecnología no debe ser una limitante para el desarrollo de sistemas de alerta temprana, sino más bien se debe hacer uso exhaustivo de ella con el fin de incrementar la eficiencia en los procesos de recolección y análisis de datos, y la comunicación de la información generada a partir de estos.

Ante la repetida ocurrencia de deslizamientos en las carreteras nacionales y la afectación que estos producen en la población, vale la pena analizar la necesidad de aplicar en el país sistemas de alerta temprana para mitigar el riesgo de los usuarios de la infraestructura vial nacional.

Referencias bibliográficas

1. Azzam, R., Fernandez-Steegeer, T., Arnhardt, C., Klapperich, H. & Shou, K. (2011). Monitoring of landslides and infrastructures with wireless sensor networks in an earthquake environment. Memorias de la conferencia 5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. Chile: International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.

2. Banco Mundial (2005). Zonas críticas de desastres naturales: Análisis del riesgo en todo el mundo. Estados Unidos: Banco Mundial.

3. Cordero, D. (2011). Desplazamiento de taludes por sismo. Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ingeniería Civil para optar al grado y título de Maestría Académica en Ingeniería Civil. San José, Costa Rica: Sistema de Estudios de Posgrado, Universidad de Costa Rica.

4. Ellis & Reid. (2000). Landslide instrumentation/ Landslide Monitoring and Warning. Landslide Hazard Program. Honduras: United States Geological Survey.

5. Grasso, V. (2006). Early Warning Systems: State-of-Art Analysis and Future Directions. Estados Unidos: United States Environment Programme (UNEP).

6. IFRC (2009). World Disaster Report 2009 – Focus on early warning, early action. Francia: International Federation of Red Cross and Red Crescent.

7. Lacasse, S. & Nadim, F. (2011). Learning to Live with Geohazards: From Research to Practice. Memorias de la conferencia GeoRisk 2011 Geotechnical Risk Assessment & Management. (pp. 64-116). Estados Unidos: Geo-Institute, American Society of Civil Engineers.

8. Ortigao, J. & Sayao, A. (2004). Handbook of Slope Stabilization. Alemania: Springer.

9. Suárez, J. (2009). Deslizamientos. Volumen 1 y 2. Bucaramanga, Colombia: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Ingeniería de Suelos Ltda.

10. Vargas, L. (2002). Sistemas de alerta para la prevención de deslizamientos por lluvia. Tesis sometida a la consideración del Programa de Estudios de Posgrado en Ingeniería Civil para optar al grado de Magister Scientiae. San José, Costa Rica: Sistema de Estudios de Posgrado, Universidad de Costa Rica.