

Sistema multiparamétrico de monitoreo remoto de movimientos por remoción en masa*¹

[A multiparameter system for remote monitoring of landslides]

JOHN MAKARIO LONDOÑO², CÉSAR AUGUSTO VEGA³
LILIANA MARÍA MAYA⁴

RECIBO: 20.02.2013 - APROBACIÓN: 23.06.2013

Resumen

Se desarrolló un sistema que permite monitorear remotamente movimientos de remoción en masa, usando sensores de diferentes características, mediante un esquema multi-paramétrico. En este caso se usaron sensores tipo geófono, termocupla, pluviómetro, higrómetro, e inclinómetro. La información capturada se digitaliza en campo usando una tarjeta digitalizadora diseñada en este trabajo, con la característica de variabilidad en la tasa de muestreo en cada canal de adquisición. Mediante un sistema informático, la información es procesada, analizada usando un sistema experto basado en reglas y árboles de decisiones, y posteriormente almacenada en una base de datos. El sistema permite la georeferenciación de la información de los sensores y puede ser desplegada al estilo de un Sistema de Información Geográfica básico. Mediante un esquema de alertas, usando un sistema experto estilo árbol de decisiones (Decision Tree), el sistema envía información sobre el

* Modelo para citación de este artículo:

LONDOÑO, John Makario; VEGA, César Augusto & MAYA, Liliana María (2013). Sistema multiparamétrico de monitoreo remoto de movimientos por remoción en masa. En: Ventana Informática. No. 28 (ene.-jun.). Manizales (Colombia): Facultad de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Manizales. p. 67-82. ISSN: 0123-9678

- 1 Artículo de investigación científica y tecnológica proveniente del proyecto *Sistema para monitoreo remoto de deslizamientos de tierra*, ejecutado en el periodo abril 2009 – junio 2011, e inscrito en el grupo de investigación en Geomática y Medio Ambiente de la Universidad de Manizales.
- 2 Geólogo, MSc., PhD. en Geociencias. Profesional Especializado, Servicio Geológico Colombiano (Manizales, Caldas, Colombia). Correo electrónico: jmakario@sgc.gov.co
- 3 Ingeniero de Sistemas y Telecomunicaciones, Auditor de Sistemas. Contratista, Servicio Geológico Colombiano (Manizales, Caldas, Colombia). Correo electrónico: cvega@sgc.gov.co
- 4 Ingeniera Civil. Profesional independiente. Correo electrónico: lmmaya@hotmail.com

estado de actividad del deslizamiento de tierra, permanentemente. Se realizaron pruebas piloto en un movimiento por remoción en masa activo, ubicado en el municipio de Manizales (Caldas, Colombia), durante un mes. Los resultados muestran una respuesta adecuada del sistema ante la actividad del deslizamiento, evidenciando su uso para monitorear otros deslizamientos de tierra en regiones pobladas.

Palabras clave: *Movimientos por remoción en masa, sistema monitoreo multiparámetro, sistema experto.*

Abstract

A remote system to monitoring active landslides was developed, by using a multi-parameter device, middle-low cost sensors, and an expert system based on rules. The system consists of six (6) analogue sensors: geophone, hygrometer, rain gauge, thermocouple, tiltmeter. All the sensors are connected to a A/D converter board of variable rate sampling, which stores, packs and transmit digitally the information to a remote device (PC or computer server). At the remote device, an expert system based on rules by means a Decision Tree (DT), and developed in open source code, processes the data and analyses the information, given a state or activity level of the landslide continuously. Information is stored in a data base. A technique of changes in slope of cumulative normalized curves of the data set for each sensor and a combination of them, is used as a one of the parameters to evaluate the level of activity of the landslide. The system was installed in an active landslide at Manizales city (2100 masl), located in the central part of Colombia, at the Andean zone. The system collected data for 1 month. Preliminary results showed that the system is able to detect temporal changes in several parameters, allowing to have an idea of the level of activity of the monitored landslide. The system can be useful for monitoring zones with very active landslides and with population living near it, in order to alert promptly in case of a possible strong mass movement.

Keywords: *Landslide, multi-parameter remote monitoring system, expert system.*

Introducción

Los movimientos por remoción en masa (MRM), comúnmente conocidos como deslizamientos de tierra, son uno de los fenómenos naturales más comunes en la región colombiana, en especial, en la zona andina. Permanentemente, se presentan desastres debido a la

acción de éste fenómeno, causando pérdidas materiales, e incluso vidas humanas.

El uso de sistemas de monitoreo remoto en movimientos por remoción en masa, es un tema que se ha venido desarrollando con mucha fuerza en la última década. Las ventajas que trae monitorear permanentemente un fenómeno, sobre las mediciones puntuales en el mismo, es uno de los grandes avances en ésta área. Sin embargo, no todos los sistemas de monitoreo disponibles pueden ser efectivos, apropiados y oportunos para ciertas regiones. Por ejemplo, en el caso colombiano, las condiciones climáticas restringen de manera importante la aplicación de sensores remotos como imágenes de satélite o GPS, para monitorear movimientos por remoción en masa. Por otra parte, los costos de muchos de estos sistemas son muy altos para países en vías de desarrollo o economías emergentes.

Este trabajo busca desarrollar un sistema con características apropiadas para monitorear un movimiento por remoción en masa in situ, usando sensores de bajo o medio costo, que midan ciertas variables, susceptibles a dicho movimiento, como son cambios en la presión de poros, temperatura interna de la masa de tierra, pequeños movimientos internos de la misma, cambios en la inclinación del terreno, variaciones en la humedad relativa, y precipitación en el área donde se encuentra el movimiento. La combinación apropiada de las variables medidas, así como el uso de sistemas informáticos específicos, permiten obtener una evaluación del nivel de actividad de un movimiento por remoción en masa.

1. Situación actual del monitoreo de MRM: marco teórico

Las investigaciones realizadas durante décadas sobre esta temática han permitido conocer en forma muy detallada el comportamiento físico-mecánico de los movimientos por remoción en masa (Derek, 2005, 596; Takahashi, 2010; Nedoma, 2010). Una de las principales causas de generación de movimientos por remoción en masa (de aquí en adelante, MRM) en zonas tropicales es la lluvia. Existe una relación directa entre el aumento de las precipitaciones y la ocurrencia de movimientos por remoción en masa (Larsen, 2008; Miller, Agnes & McBrewster, 2009). Aunque las lluvias son un fenómeno muy asociado con MRM, muchas veces no son la causa del deslizamiento, sino más bien, el agente disparador o detonante (Londoño, Vega & Maya, 2010). Para clasificar los MRM ha habido diferentes metodologías; sin embargo, la más aceptada ha sido la de Varnes (1978) y modificada por Cruden & Varnes (1996).

El monitoreo de MRM ha tenido una evolución importante en los últimos 10 años. Borgatti, Vittuari & Zanutta (2010), sostienen que varias consideraciones se deben tener en cuenta al momento de monitorear un MRM. La primera es la extensión y la velocidad de desplazamiento del MRM; la segunda es las condiciones del sitio a monitorear (tipo de vegetación, uso del suelo, relieve, etc.). En cuanto al monitoreo para estudio del comportamiento de MRM, se utilizan equipos muy costosos, y la instalación y operación de los mismos, igualmente es costosa. Muchos de ellos se hacen en laboratorio o MRM artificiales o controlados, según Ochiai, Sammori & Okada (2010). Entre los equipos usados para el monitoreo de estudio de MRM se encuentran piezómetros de alta sensibilidad, enterrados incluso a más de 100 m, extensiómetros de alta precisión, distanciómetros, inclinómetros, GPS, entre otros. Para el caso de zonas urbanas, consideran Canuti et al. (2010), se requiere del uso de sistemas de alerta temprana, con instrumentación in situ para mitigar el riesgo.

En lo que respecta a desarrollo de sistemas de monitoreo, algunas entidades y organismos de investigación han desarrollado sistemas instrumentales multisensoriales, que traten de alertar sobre la generación de MRM; sin embargo, los costos de tales desarrollos y equipos son sumamente altos en términos de desarrollo de los mismos y en utilización o masificación de su uso. Por ejemplo, el sistema *Multisensor based monitoring system for disaster prevention*, según ETHZ (2004) planeado para desarrollarse en un proyecto de cooperación entre China y Suiza intenta integrar diferentes sensores en un solo sistema de monitoreo para geotecnia, ingeniería civil y deslizamientos de tierra. Por otra parte, la compañía Geodev (2005) desarrolla sistemas de monitoreo de deslizamientos de tierra, usando tecnología GPS e instrumentos convencionales geodésicos (teodolitos, distanciómetros), integrados en un sistema remoto de monitoreo (RMS siglas en inglés) pero no utiliza sistemas integrando diferentes sensores que monitoreen diferentes parámetros para tal efecto.

La compañía japonesa Furuno (2005), ha desarrollado un sistema que utiliza una red de estaciones de GPS pero no usa otros instrumentos o sensores. En la Universidad Southern Cross de Australia, Pennel, Ruberu & Flentje (2005) desarrollaron un sistema de monitoreo de deslizamientos utilizando inclinómetros y piezómetros. La compañía Kane Geotech Inc. (2004) ha implementado algunos sistemas para el monitoreo de deslizamientos utilizando un sistema de alarma, conectado a inclinómetros, u otros aparatos, pero no los integra en un solo sistema único de sensores que diagnostique el estado del deslizamiento.

En muchas partes del mundo se han desarrollado sistemas de monitoreo en tiempo real de MRM, pero la gran mayoría se restringen a unos pocos

sensores, o básicamente a un solo tipo de sensores, en particular a receptores GPS (Cornejo, 2004; Kandawasvika & Reinhardt (2005) y El Bedoui & Lebourg, 2007). Uno de los sistemas de monitoreo en tiempo real de MRM más completo que existe o que se ha desarrollado, es el sistema *Early warning monitoring system*, desarrollado por la empresa italiana AQUATER. El sistema usa el software LabView de la empresa Nacional Instrument y un convertidor Análogo/Digital (A/D) con un procesador interno para coleccionar datos de diferentes sensores: distanciómetro láser, geófono sísmico, transductor de presión y pluviómetro. Este sistema, señalan Zan et al. (2002), no ha sido comercializado y obedece más a un proyecto piloto que se desarrolla en Italia.

Recientemente, Ramesh (2009) desarrolló un sistema inalámbrico para monitorear MRM en India, usando geófonos, piezómetros y pluviómetros ubicados en un mismo punto dentro de un tubo enterrado en un MRM activo. Este sistema envía datos solamente cada cinco minutos, y mucha parte del tiempo permanece apagado, para el ahorro de energía.

Se concluye entonces, que a pesar de existir en la actualidad sistemas que realizan el monitoreo de MRM, la gran mayoría son costosos, o no realizan el monitoreo de una manera integral. Por esta razón el desarrollo de este tipo de sistemas es una necesidad, en particular en países en vías de desarrollo, donde las condiciones económicas no permiten la implementación de sistemas costosos.

2. Desarrollo del sistema

El sistema para monitoreo de MRM, llamado aquí, Sistema de Monitoreo de Deslizamientos Universidad de Manizales, SMDUM, está compuesto de dos partes básicas:

- Componente Hardware: sensores, tarjeta A/D de adquisición multi-paramétrica, sistema de transmisión digital.
- Componente Software: módulo de adquisición y empaquetamiento de información, aplicación módulo de visualización, almacenamiento y procesamiento, Sistema experto (árbol de decisiones).

La Figura 1a, muestra el esquema conceptual del sistema SMDUM. Una de las características fundamentales del sistema desarrollado es el concepto Multi-parámetro, es decir, varios parámetros siendo medidos simultáneamente bajo un mismo esquema integrado tanto en hardware como en software.

Los esquemas actuales, por lo general, registran parámetros independientemente, enviando las señales de los diferentes parámetros

de manera individual y luego son agrupados normalmente, a nivel de software solamente, o agrupando información en un sitio para luego ser empaquetada y enviada posteriormente. En contraste, el concepto Multi-parámetro permite el ahorro importante tanto en hardware como en consumo de energía, ya que toda la información es transmitida por un mismo canal, usando solamente un solo radio-modem, sin necesidad de aditamentos adicionales o procedimientos complejos para lograr agrupar toda la información simultáneamente. Para lograr este objetivo, se requirió del diseño de un hardware específico, en lo que respecta a la recolección de información, lográndose finalmente desarrollar una tarjeta A/D multi-paramétrica, la cual se encuentra en acople con un software diseñado, específicamente para trabajar en conjunto con la tarjeta.

El concepto de estación multi-parámetro ha sido usado, en especial para monitorear simicidad o emisiones de gases midiendo de manera simultánea diferentes parámetros en un mismo sitio o en sitios relativamente cercanos a una estación base (Streil, Balcázar & Oeser, 2002; Seidl et al., 2003; Kumsar et al., 2008). En el caso de este trabajo, la información es colectada simultáneamente desde los diferentes sensores por el mismo sistema, sin un paso adicional de agruparlos usando otro equipamiento diferente. Esta variación del concepto de multi-parámetro ha permitido desarrollar un sistema robusto, liviano y de bajo costo para ser instalado rápidamente en cualquier sitio que requiera monitoreo de MRM.

2.1 Componente hardware

La tarjeta multi-parámetro de adquisición de datos (Figura 1b), tiene las siguientes características básicas y específicas para este proyecto:

- 8 canales o entradas analógicas,
- 2 canales o entradas digitales,
- Resolución de 12 bits,
- Rata de muestreo programable para cada canal de manera independiente,
- Amplificador de ganancia programable para cada canal (1x, 2x, 4x, 8x, 16x, 32x, 64x) de manera independiente.

Estas características de la tarjeta, permiten la conexión de hasta ocho sensores análogos diferentes y dos digitales, los cuales pueden ser de características muy diferentes en la rata de muestreo; tal es el caso del tipo de sensores que fueron usados en este proyecto, los cuales van desde ratas de muestreo de 100 muestras/s hasta 1 muestra/s. Así mismo, la tarjeta permite que cada sensor pueda ser amplificado de manera independiente, ya que cada uno tiene características propias.

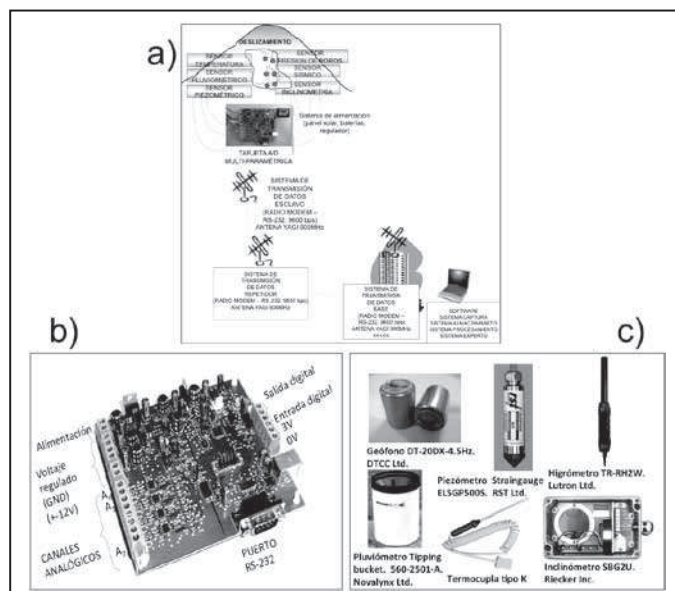


Figura 1. a) Esquema conceptual del SMDUM. b) Tarjeta A/D de adquisición multi-paramétrica diseñada para el proyecto.

Los parámetros que se escogieron para medir el estado de actividad de un MRM activo fueron: pluviosidad, humedad o saturación del suelo, microsismicidad, temperatura, e inclinación del terreno, basados tanto en experiencia previa de los autores en éste tipo de mediciones y en recomendaciones y experiencias en otros sitios del mundo (Reid et al, 2008). La clave para una evaluación más confiable del nivel de actividad de un MRM, es la combinación de una variedad de parámetros que permitan conocer su comportamiento desde diferentes perspectivas y esa fue otra premisa para la escogencia de los sensores. La figura 1c, muestra el tipo de sensores utilizados en este trabajo.

El sistema de transmisión consiste básicamente en radios-modem digitales y antenas tipo YAGI de 12 elementos, de 902-928 MHz, con ganancia central de 14 dB, ancho de banda de 26 MHz, y polarización vertical y horizontal. El sistema de alimentación consiste de un panel solar de 65W, dos baterías estacionarias libres de mantenimiento de 12V – 50Amp/h, y un regulador fotovoltaico de 10Amp.

2.2 Componente software

El software está dividido en tres partes principales: un módulo de adquisición y captura de información, un módulo de almacenamiento y despliegue de información, y un módulo de análisis de la información encargado del procesamiento y evaluación del estado de actividad del

MRM, mediante un sistema experto, basado en un árbol de decisiones (*Decision Tree*):

- El Módulo de adquisición y captura de información, permite la captura de la información que es enviada desde el campo hasta la estación base. Verifica que los datos que están siendo transmitidos no contengan errores de transmisión y que los paquetes enviados estén correctos. Por otra parte, tiene la tarea de empaquetar la información y enviarla directamente al módulo que se encarga del almacenamiento de la información en una base de datos. Adicionalmente, crea archivos en formato ASCII de la información enviada desde el campo, cada determinado tiempo, el cual puede ser programado por el usuario, como medio redundante para evitar pérdida de información.

- El Módulo de almacenamiento y despliegue de información, se encarga de almacenar la información en una base de datos, la cual fue diseñada en el motor Postgres. Así mismo, despliega o visualiza la información adquirida. También, permite observar valores acumulados normalizados de cada sensor, con el fin de determinar visualmente cambios que puedan alertar sobre variaciones en la actividad del MRM. El sistema usa un esquema de niveles por sensor (normal, precrítico, crítico) para verificar permanentemente el estado de actividad de cada sensor.

- El Módulo Sistema de Información geográfica (SIG), tiene la función básica de desplegar la información de los sensores en un SIG básico, el cual permite observar en tiempo real el estado de cada sensor en un mapa, imagen aérea, satelital o de cualquier otro tipo. Los estados de actividad de los sensores, son los mismos que se han definido anteriormente (Normal, precrítico y crítico), y se representan en el SIG, mediante un círculo relleno con el color del nivel, ubicado en la localización espacial del sensor.

- El Módulo de análisis de la información consiste en un Sistema Experto que permite la evaluación del estado de actividad del MRM y se encarga de realizar el análisis de la información colectada y establecer el nivel de actividad del MRM. Para ello realiza una serie de análisis y evaluaciones, las cuales han sido previamente parametrizadas, unas por el sistema y otras definidas por el usuario.

Para realizar estas tareas, se parte del modelo de evaluación del nivel de actividad del MRM. Monroy & Londoño (2005) desarrollaron un método para evaluar el nivel de actividad de un fenómeno natural que esté siendo monitoreado usando diferentes técnicas o sensores. Éste método fue adaptado al presente trabajo. El nivel de actividad se evalúa mediante el uso de un árbol de decisiones (DT). Se definió un árbol con un nodo raíz (nivel de actividad), siete nodos hojas (sensores) con

ocho nodos ramas cada uno (reglas y límites mínimo y máximo de los niveles de los sensores), usando el algoritmo ID3 (Quinlan, 1987). La Figura 2 muestra la construcción del árbol.

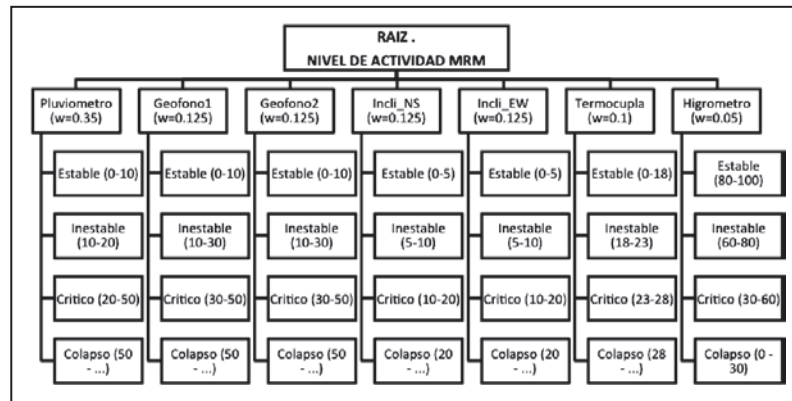


Figura 2. Construcción del árbol de decisiones (DT) del Sistema Experto.
w=peso del sensor. Entre paréntesis en cada sensor se han puesto los valores de los límites inferior y superior de cada sensor en cada nivel de actividad.

El árbol de decisiones (DT) se creó a partir de parámetros para cada uno de los sensores, los cuales fueron definidos de acuerdo a ciertos valores que se estimaron como promedios dependiendo del nivel de actividad del MRM (Canuti et al, 2010; Reid et al., 2008) y pesos asignados a cada sensor de acuerdo a la preponderancia de la variable a medir con respecto a la evaluación del MRM. La Tabla 1, presenta las características de los sensores y los rangos de valores para la construcción de los parámetros de decisión con los niveles para cada uno de los sensores utilizados en el monitoreo del MRM.

Se tomó por defecto una ventana de tiempo de una hora para evaluar precipitación y número de vibraciones por unidad de tiempo, ya que se considera un tiempo prudencial para evaluar el estado de actividad de un MRM, aunque el usuario puede cambiarlo de acuerdo a su necesidad. Para el inclinómetro se tomó como parámetro de evaluación, la resultante de las diferentes componentes instaladas, usando la suma vectorial de las mismas. A los resultados obtenidos del DT para cada sensor, se le aplica el método de Monroy & Londoño (2005) para calcular el nivel de actividad del MRM.

Adicionalmente, se implementaron métodos automáticos para la detección de señales tanto de los geófonos como del pluviómetro, los cuales requieren un tratamiento especial, diferente a los otros sensores, y los

cuales son dos de los sensores claves para evaluar el estado de actividad de un MRM, según el esquema adoptado en este trabajo. Por otra parte, para el pluviómetro, o sensor de pluviosidad, se requería contar el número de picos en la señal digitalizada, en un determinado intervalo de tiempo para aplicar la fórmula de conversión, y así obtener la cantidad de agua lluvia por unidad de tiempo.

Tabla 1. Características de los sensores usados para monitorear un MRM y Parametrización de los niveles de actividad para monitoreo de un MRM.

Característica	Geófono	Higrómetro	Termocupla	Pluviómetro	Inclinómetro
Modelo	DT-20DX-4.5Hz	TR-RH2W	K	Tipping bucket	SGB2U
Salida	5V	4 – 20 mA	0-5V	Pulso de 100 ms	0-5V (12mA)
Sensibilidad	23.4 V/m/s	NA	NA	1 tip / 1mm	200 mV/°
Precisión	NA	±3%	±0.1 °C	2% 2"/hora	<0.003°
Rango	±10V	10 – 95 %	0-300 °C	Ilimitada	1-30°
Nivel de actividad	Geófono (vibrac/H) Peso=0.25	Higrómetro (%) Peso=0.05	Termocupla (°C) Peso=0.1	Pluviómetro (mm3 / H) Peso= 0.35	Inclinómetro(°) Peso=0.25
1. Estable	0-10	80-100	0-18	0-10	0-5
2. Inestable	10-30	60-80	18-23	10-20	5-10
3. Crítico	30-50	30-60	23-28	20-50	10-20
4. Colapso	>50	0-30	>28	>50	>20

Para ello se analiza cada traza de la señal obtenida y se determinan los cambios de amplitud, los cuales básicamente están asociados con caída de agua dentro del sensor que genera los *golpeteos* o *tips* y produce los picos en la señal. Así mismo, para el caso de los sensores tipo inclinómetro, se requiere evaluar el vector resultante de las diferentes componentes, dado, que lo que se evalúa es el ángulo resultante. Por tal motivo, el sistema necesita determinar automáticamente el número de sensores que son inclinómetros y sus componentes y luego realizar la suma vectorial sobre los promedios acumulados de las componentes para calcular el ángulo de inclinación de la masa rocosa.

Otra forma que se implementó para evaluar el nivel de actividad de cada sensor, y por ende el estado del MRM, de manera visual, fue el cálculo de las variaciones de los ángulos de las pendientes en las curvas acumuladas promediadas y normalizadas de cada sensor. Para ello se implementó un algoritmo que evalúa las variaciones de la pendiente con el tiempo para cada sensor y ubica una línea punteada en cada porción de las gráficas de los sensores, donde se detecten cambios de pendiente superiores a cierto valor, respecto a la anterior pendiente. Este algoritmo es muy útil para observar si las variaciones en los sensores se dan de manera

simultánea o con cierto intervalo de tiempo, y para detectar la aceleración del proceso, lo cual ayuda en la evaluación del comportamiento del MRM en un intervalo de tiempo definido por el usuario

4. Resultados

El sistema SMDUM fue instalado entre el 18 de enero y 27 de febrero de 2011, en un MRM ubicado al SE de Manizales, en el barrio Minitas, el cual ha presentado fuerte actividad en años pasados, y ahora está siendo intervenido por Corpocaldas. La Figura 3a muestra la localización del sector seleccionado. El sitio presenta un MRM, de tipo rotacional complejo, al cual se le han realizado intervenciones geotécnicas por varios años. Cada sensor fue cuidadosamente instalado y probado (Figura 3b). Así mismo, se realizaron las calibraciones del caso, de manera que se pudieran luego convertir los voltajes de cada sensor que entra a la tarjeta, y luego las cuentas que esta envía por cada sensor, a su respectiva unidad de medida real. Se seleccionaron valores iniciales promedios para cada sensor, para el MRM a monitorear, basados en estudios publicados sobre monitoreo de MRM (Canuti et al, 2010; Reid et al., 2008) similares a los mostrados en la Tabla 2.

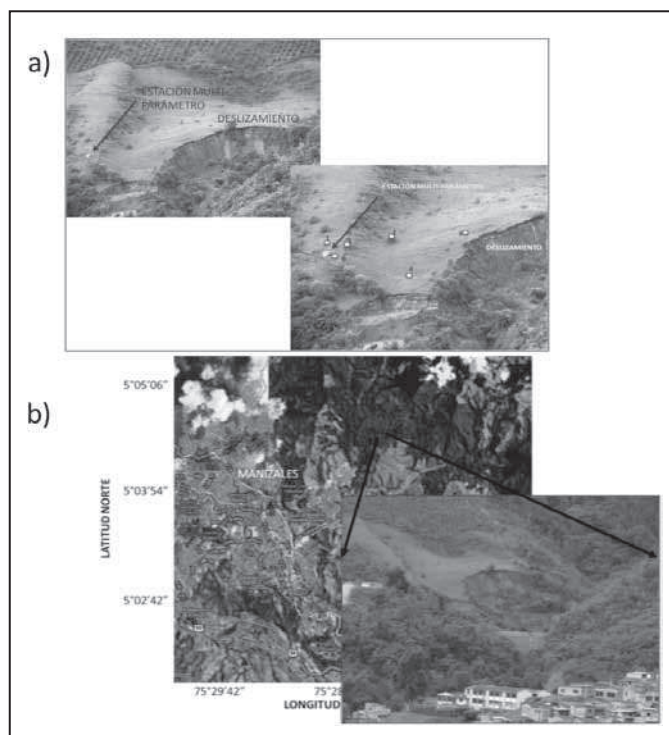


Figura 3. a) Localización del sector donde se ubicó el MRM para ser monitoreado. b) Detalles de la configuración final de la instalación del sistema SMDUM en un sector con MRM activo en la ciudad de Manizales.

Se utilizaron dos geófonos, con el objeto de detectar mejor las vibraciones que pudiera presentar el MRM. Así mismo, el inclinómetro requiere el uso de dos canales, ya que posee dos componentes horizontales ortogonales, lo que permite una mejor evaluación del movimiento de la masa de tierra que se está monitoreando espacialmente. El pluviómetro requiere una tasa de muestreo alta, debido al pulso que envía cada 0.1s. Igualmente, los geófonos requieren una tasa de muestreo alta, para poder detectar vibraciones del terreno de manera apropiada. Por el contrario, la termocupla y el higrómetro, no requieren una tasa de muestreo alta, por lo que se programó la tarjeta en 1 muestra/segundo para estos sensores.

Durante el tiempo de medición el MRM permaneció relativamente estable, con variaciones leves en algunos sensores, sin que llegaran a niveles críticos, lo cual se evidenció con la no ocurrencia de ningún evento anómalo visible en el MRM durante este tiempo. Los resultados obtenidos del monitoreo, evidencian variaciones en las variables medidas durante el tiempo de monitoreo, aunque estuvieron en rangos relativamente bajos. Las variaciones del inclinómetro son las más leves de todos los sensores, con cambios en la inclinación horizontal solamente alrededor de 0.02° (13.71° - 13.73°), lo que evidencia estabilidad del MRM durante el tiempo de monitoreo, en lo que respecta a inclinaciones horizontales.

Por otra parte, los geófonos alcanzaron en algunos momentos hasta 10 vibraciones por hora a finales de Febrero, lo que muestra un cierto aumento de la actividad del MRM durante unos días, pero luego disminuye. Este patrón de aumento y luego disminución de las vibraciones se repitió por lo menos tres veces durante el tiempo de monitoreo. En lo que respecta la termocupla, esta mostró variaciones entre 20 y 28°C , valores relativamente altos de la temperatura del suelo, comparados con la temperatura ambiente promedio de Manizales, lo que sugiere cierta acumulación de calor en la parte superficial del MRM analizado. El higrómetro no mostró mayores variaciones, manteniéndose la gran mayoría del tiempo en el nivel superior de humedad relativa ($>90\%$), valores comunes en el área de Manizales. El pluviómetro registró incrementos pulsátiles en el registro de precipitación, aunque la gran mayoría del tiempo estuvo en niveles bajos ($<10 \text{ mm}^3/\text{día}$), coincidente con la época de relativa poca lluvia durante enero y febrero de 2011 (Figura 4).

Los ángulos de las pendientes para las curvas acumuladas promediadas y normalizadas para cada sensor, presentaron algunas variaciones, aunque estas no fueron simultáneas para todos los sensores, lo que indicaría variaciones puntuales en alguno de los sensores, pero que no afectó de manera importante el MRM. Esto nuevamente corrobora la estabilidad del MRM durante el tiempo de monitoreo.

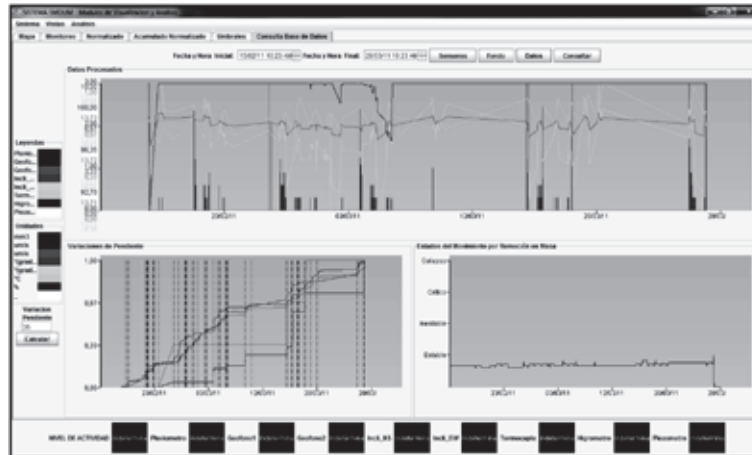


Figura 4. Resultados del monitoreo de un MRM activo localizado en el sector de Minitas, Manizales. Promedio horario para cada sensor. Periodo enero 20 a febrero 27 de 2011.

En general, se puede concluir que los sensores aunque registraron variaciones, los valores se mantuvieron estables durante el tiempo de monitoreo. No obstante, algunos sensores presentaron datos anómalos durante el tiempo de monitoreo (Londoño, Vega & Maya, 2010). Estos datos anómalos, posiblemente estén asociados a interferencias electrónicas, ruidos, viento, y actividad humana. Se requiere de un tiempo mayor de monitoreo de un MRM activo para obtener mejores datos y por lo tanto mejores conclusiones sobre su actividad. No obstante, con los resultados preliminares de esta prueba realizada, se concluye que el sistema permite detectar cambios en los parámetros evaluados.

5. Consideraciones finales y conclusiones

El sistema SMDUM, es un sistema robusto, con versatilidad suficiente para monitorear un MRM activo, usando la combinación de diferentes sensores, los cuales pueden combinarse de acuerdo a las necesidades del usuario. El diseño de una tarjeta A/D multi-paramétrica, específica para este fin, le dan una amplio espectro de utilización en el monitoreo de MRM. Por otra parte, el sistema podría ampliarse para implementar una red de monitoreo de diferentes MRM en distintos lugares, con la integración de varias tarjetas multi-paramétricas. Adicionalmente, se podrían utilizar otro tipo de sensores, como cámaras de video con detección de luz infrarroja, extensómetros, entre otros.

El sistema SMDUM está desarrollado en plataforma libre, lo que facilita su modificación sin depender de licencias comerciales. Por otra parte, la tarjeta A/D puede programarse totalmente, según la necesidad del usuario. La facilidad de instalación de los equipos en campo, son otra ventaja que tiene el sistema, ya que en unas cuantas horas, es posible instalar todo el equipo, aspecto que es muy crucial cuando un MRM está muy activo y requiere de monitoreo inmediato.

La prueba realizada en un MRM activo en la ciudad de Manizales, demuestra que el sistema SMDUM es capaz de detectar y evaluar el nivel de actividad de un MRM activo, tomando como información las variables pluviosidad, microsismicidad, temperatura, humedad o saturación del suelo, e inclinación.

El sistema puede adaptarse fácilmente para medir otras variables diferentes a las utilizadas en este proyecto. Al ser un sistema abierto y al que se le puede incluir cualquier sensor analógico, siempre y cuando esté adecuado a la entrada de la tarjeta, la evaluación de cualquier variable que se pueda medir en un MRM podría realizarse fácilmente.

6. Agradecimientos

Los autores desean agradecer a diferentes personas y entidades que permitieron llegar a feliz término con este proyecto piloto. En primer lugar, a Colciencias y la Universidad de Manizales, por el apoyo financiero para poder desarrollar la idea. Así mismo a Corpocaldas; a Amparo Coral, del Servicio Geológico Colombiano, por apoyo en la adecuación de los equipos para su instalación y en la configuración del sistema de transmisión. A José Fabio Gómez y Ánderson Cardona por su apoyo en campo. Al geólogo Jaime Raigosa por su apoyo y asesoría en varios aspectos del desarrollo del sistema.

7. Referencias bibliográficas

- BORGATTI, L.; VITTUARI, L. & ZANUTTA, A. (2010). Geomatic methods for punctual and areal control of surface changes due to landslide phenomena. In: WERNER, E.D. & FRIEDMAN, H.P. (eds.) (2010). Landslides: causes, types, and effects. Series: Natural Disaster Research, Prediction and Mitigation. New York (USA): Nova Science Publishers. Chapter 4. p. 133-176. ISBN: 978-1-61470-186-6
- CANUTI, P.; CASAGLI, N.; CATANI, F.; FALORNI G. & FARINA, P. (2010). Integration of Remote Sensing techniques in different stages of landslide response. In: SASSA, K.; FUKUOKA, H.; WNAG, F. & WANG, G. (eds). Progress in Landslide Science, Chapter 18. New York (NY, USA): Springer. p. 251-260. ISBN: 978-3-540-70965-7
- CORNEJO, D.A. (2004). Sistema de monitoreo remoto para el control de deslizamientos. En: Compendio de trabajos de investigación CNDG. Vol. 5, Lima (Perú): Biblioteca Instituto Geofísico del Perú. p. 173-182.
- CRUDEN, D.M. & VARNES, D.J. (1996). Landslide types and processes. In: TURNER, K.A. & SCHUSTER, R.L. (eds.). Landslides investigation and mitigation. Transportation Research Board Special Report 247. Collection National Research Council (U.S.) Transportation Research Board Special Report. Washington D.C. (USA): National Academy Press, p. 36-75. ISBN: 030906208X.
- DEREK, H.C. (2005). Landslides in Practice. Investigation, Analysis and Remedial/Preventive options in Soils. Hoboken (NJ, USA): Wiley & Sons Inc. 624 p. ISBN: 978-0471678168.
- EL BEDOUI, S. & LEBOURG, T. (2007). Multi parametric study of the "Vence" landslide, at different time and spatial scales (Alpes-Maritimes, France). In: European Geosciences Union, General Assembly 2007 (15-20/04/2007), Vienna (Austria): European Geosciences Union. Geophysical Research Abstracts, vol. 9. Goettingen (Niedersachsen, Germany): Copernicus Publications. <<http://meetings.copernicus.org/www.cosis.net/abstracts/EGU06/03065/EGU06-J-03065.pdf>> [consult: 12/10/2012]
- FURUNO (2005). Furuno Terrain Remote Monitoring System DANA 2000 [online]. Nishinomiya (Japan): Furuno Electric Co. Ltd. <<http://www.furuno.co.jp/english/dana2000/index.html>> [consult: 10/10/2012].
- GEODEV (2005). Remote Monitoring System, RMS [online]. Manno (Switzerland): Geodev Earth Technologies. <<http://www.geodev.ch/pdf/RMS%20lite%20eng.pdf>> [consult: 10/12/2012].
- INSTITUTE OF GEODESY AND PHOTOGRAMMETRY, ETHZ (2004). Multisensor based monitoring system for disaster prevention. Zurich (Switzerland): Institute of Geodesy and Photogrammetry <<http://www.geometh.ethz.ch/research/mumosy/mumosy.asp>> [consult: 29/10/2012]
- KANDAWASVIKA, A. & REINHARDT, W. (2005). Concept for interoperable usage of multi-sensors within a landslide monitoring application scenario Published in: 8th. AGILE Conference on GIScience (26-28/05/2005), Estoril (Portugal): The Association of Geographic Information Laboratories for Europe, AGILE. 8th AGILE Proceedings. 2.1: Interoperable geo-spatial technology. Enschede (NL): AGILE, p. 13-26. <http://agile.gis.geo.tu-dresden.de/web/Conference_Paper/CDs/AGILE%202005/papers/12_Admire%20Kandawasvika.pdf>, <http://itcnt05.itc.nl/agile_old/Conference/estoril/papers/12_Admire%20Kandawasvika.pdf> [consult: 04/04/2013]
- KANE GEOTECH (2004). Landslide Monitoring/Alarm System [online]. Stockton (CA, USA): Kane Geo Tech, Inc. <http://www.kanengeotech.com/case_i5.htm> [consult: 20/09/2012]
- KUMSAR, H.; AYDAN, O.; TANO, H.; ULUSAY, R.; ÇELİK, S.B. & KAYA, M. (2008). Multi-parameter measurement system in Denizli basin (Turkey) and its applications for earthquake prediction. In: First Collaborative Symposium of Turk-Japan Civil Engineers (05/06/2008), Istanbul (Turkey): JSCE, Istanbul Technical University and Turkish Civil Engineers Chamber. Proceedings, p. 75-92.
- LARSEN, M.C. (2008). Rainfall-triggered landslides, anthropogenic hazards, and mitigation strategies [online]. In: Advances in Geosciences, Adgeo: An Open Access Journal for Refereed Proceedings and Special Publications, Vol. 14, Goettingen (Niedersachsen, Germany): Copernicus Publications. p. 147-153. eISSN: 1680-7359. <<http://www.adv-geosci.net/14/147/2008/>> [consult: 03/09/2012]

- LONDOÑO, J.M.; VEGA, C.A. & MAYA, L.M. (2010). A multi-parameter remote system to monitoring active landslides by using middle-low cost sensors [online]. In: 2010 AGU Fall Meeting (13-17/12/2010), San Francisco (CA, USA): American Geophysical Union, AGU. Abstract Poster NH23A-1421, AGU Fall meeting 2010. Washington, DC (USA): American Geophysical Union, AGU. <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2010AGUFMNH23A1421L>> [consult: 02/04/2013]
- MILLER, F.P.; AGNES, F.V. & MCBREWSTER, J. (2009). Landslide: List of geological phenomena, gravitation, slope stability, causes of landslides, landslide classification, landslide dam, landslide mitigation, submarine landslide, mudslide, mass wasting. Beau-Bassin (Mauritius): Alphascript Publishing. 76 p. ISBN: 978-6130225810.
- MONROY, M.E. & LONDOÑO, J.M. (2005). Implementación de un SIG como ayuda en la evaluación de la actividad volcánica. En: Ventana Informática, No. 13 (jul-dic). Manizales (Colombia): Universidad de Manizales, p. 23-45. ISSN: 0123-9678.
- NEDOMA, J. (2010). Special problems in landslide modeling: Mathematical and Computational methods. In: WERNER, E.D. & FRIEDMAN, H.P. (eds.) (2010). Landslides: causes, types, and effects. Series: Natural Disaster Research, Prediction and Mitigation. New York (USA): Nova Science Publishers. Chapter 10. p. 263-389. ISBN: 978-1-61470-186-6
- OCHIAI, H.; SAMMORI, T. & OKADA, Y. (2010) Landslide experiments on artificial and natural slopes. [online]. In: SASSA, K.; FUKUOKA, H.; WANG, F. & WNAG, G. (eds.). (2010). Progress in Landslide science, Chapter 15. Berlin (Germany): Springer-Verlag. p. 209-226. eISBN: 978-3-540-70965-7. <http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-540-70965-7_15#page-1> [consult: 02/04/2013]
- QUINLAN, J.R. (1987). Simplifying decision trees [online]. In: International Journal of Man-Machine Studies, Vol. 27, No. 3, (sep). Philadelphia (PA, USA): Elsevier. p. 221-234. ISSN: 0020-7373. <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020737387800536>> [consult: 03/04/2013].
- RAMESH, M.R. (2009). Real-time Wireless Sensor Network for Landslide Detection. In: 2009 Third International Conference on Sensor Technologies and Applications (18-23/06/2009), Athens/Gyfaa (Greece): IEEE. Proceedings, p. 405-409. ISBN: 978-0-7695-3669-9
- REID, M.E.; BAUM, M.L.; LAHUSEN, R.G. & ELLIS, W.L. (2008). Capturing landslide dynamics and hydrologic triggers using near-real-time monitoring. Landslides and Engineered Slopes – Chen et al. (eds), Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-41196-7, p. 179-191.
- SEIDL, D.; HELLWEG, M.; CALVACHE, M.; GOMEZ, D.; ORTEGA, A.; TORRES, R.; BÖKER, F.; BUTTKUS, B.; FABER, E. & GREINWALD, S. (2003). The multiparameter station at Galeras Volcano (Colombia): concept and realization. In: Journal of Volcanology and Geothermal Research, vol. 125, No. 1-2 (jul). Philadelphia (PA, USA): Elsevier. p. 1-12. ISSN: 0377-0273. <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377027303000751>> [consult: 06/04/2013]
- STREIL, T.; BALCÁZAR, M. & OESER, V. (2002). EPOS- a multiparameter measuring system to earthquake research. Geofísica Internacional. vol 41, No 3, (jul-sep). México (México): Universidad Nacional Autónoma de México. p. 289-293. ISSN: 0016-7169. <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56841315>> [consulta: 04/04/2013]
- TAKAHASHI, T. (2010). Progress in Debris flow modeling. In: SASSA, K.; FUKUOKA, H.; WNAG, F. & WANG, G. (eds). Progress in Landslide Science, Chapter 5. New York (NY, USA): Springer. p. 59-77. ISBN: 978-3-540-70965-7
- VARNES, D.J. (1978). Slope movement types and processes. In: SCHUTER, R.L. & KRIZEK, R.J. (eds.) (1978). Landslides: analysis and Control. Transportation Research Board Special Report 176. Collection National Research Council (U.S.) Transportation Research Board Special Report. Washington D.C. (USA): National Academy Press, p. 11-33. ISBN: 030906208X.
- ZAN, L.; LATINI, G.; PISCINA, E.; POLLONI, G. & BALDELLI, P. (2002). Landslides early warning monitoring system [online]. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '02 (24-28/06/2002), Toronto (Canada): IEEE. Proceedings of the IGARSS '02. New Brunswick (NJ, USA): IEEE International Vol. 1, p. 188-190. <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1024983&isnumber=22036>> [consult. 03/04/2013]