

LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN LA DETERMINACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LOS MOVIMIENTOS DE LADERA EN LA CUENCA LLAMINCHÁN, REGIÓN CAJAMARCA, PERÚ

Sandra Villacorta⁽¹⁾, Miguel Llorente⁽²⁾, Luis Laín⁽²⁾, Víctor Carlotto⁽¹⁾

⁽¹⁾ INGEMMET, Av. Canadá 1470, San Borja, Lima-Perú, svillacorta@ingemmet.gob.pe

⁽²⁾ IGME, Ríos Rosas 23, Madrid-España

INTRODUCCIÓN

Este trabajo se realizó en el 2006, como parte del “Estudio Geoambiental de la cuenca Jequetepeque”, proyecto ejecutado por el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) que contó con el apoyo del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), la maestría internacional “Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Minerales” y la Red Desarrollo Sostenible-Ingeniería-Recursos Naturales (DESIR).

El objetivo de este artículo es presentar los resultados del análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera en la cuenca Llaminchán, mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Se eligió estudiar la cuenca Llaminchán, por existir antecedentes que señalan que esta zona ha sido afectada anteriormente por peligros geológicos, principalmente movimientos de ladera (ONERN, 1988; Fidel y Olivares, 1994).

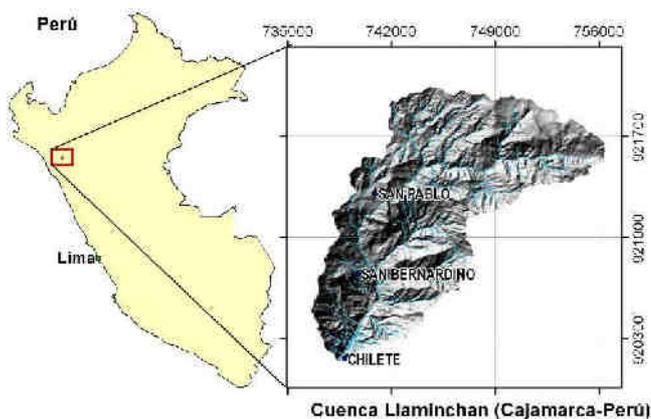


Figura 1. Ubicación de la cuenca Llaminchán.

Los movimientos de ladera son procesos mediante los cuales material que conforma una ladera se movilizan pendiente abajo principalmente por efecto de la gravedad (Cruden y Varnes, 1996). Según la clasificación propuesta por Ayala-Carcedo y Olcinas (2002), existen cuatro órdenes o tipos: simples, complejos, volcánicos y submarinos. Los movimientos simples son aquellos con un solo tipo de proceso característico y en ellos se diferencian dos familias: *movimientos con fase aérea* cuando el material involucrado desciende en caída libre, saltando o rodando a lo largo de una ladera (desprendimientos, rebotes,

rodaduras y desplomes) y *movimientos con fase terrestre* cuando el material desciende a lo largo de una ladera generalmente de pendientes media a baja, diferenciándose los que tienen superficie de ruptura (deslizamientos) y los que no tienen superficie de ruptura (reptación y flujos). Los movimientos complejos son aquellos fenómenos con más de un tipo de proceso característico; que consisten en movimientos sucesivos o simultáneos de una misma masa. Los movimientos volcánicos, son aquellos fenómenos en cuyo desencadenamiento intervienen fenómenos volcánicos como explosiones, expulsión de metano, etc; en tanto que los movimientos de ladera submarinos son generados a consecuencia de la inestabilidad de material en pendientes submarinas (Ayala-Carcedo y Olcinas, 2002).

MARCO GENERAL

La cuenca Llaminchán tiene una extensión de 115 km² y está situada al norte de Perú en la provincia de San Pablo, región Cajamarca. Los principales centros poblados de la zona de estudio son Chilete, San Pablo y San Bernardino.

La topografía es abrupta en casi toda la cuenca salvo en la parte alta, donde es suave. Las altitudes varían desde los 800 hasta los 4000 msnm. En la cuenca se presentan dos tipos de climas: semi-cálido-seco casi todo el año desde la desembocadura a la parte baja, mientras que en la parte media-alta es templado-húmedo. La precipitación promedio anual en la parte baja es de 140 a 420 mm, mientras que en la parte alta es de 600 mm (INRENA-PEJEZA, 2004).

Geomorfológicamente, se han diferenciado tres zonas: vertiente, valle y altiplanicie. La vertiente está condicionada por la tectónica, presentando crestas empinadas a escarpadas y mostrándose cortada por una red de drenaje de dirección noreste-suroeste. La zona de valle ha sido modelada por el río Llaminchán y sus afluentes. La zona de altiplanicie está restringida a la cabecera noreste de la cuenca.

Geológicamente, las rocas más antiguas que conforman el substrato de la cuenca Llaminchán son secuencias silico-clásticas del grupo Goyllarisquizga del Cretácico inferior. Estas rocas se encuentran cubiertas por rocas carbonatadas de las formaciones Chulec y Pariatambo del Cretácico inferior tardío; y rocas de la formación Cajamarca del Cretácico superior. Sobreyaciendo a las unidades anteriormente descritas y en discordancia angular, se tienen niveles de capas rojas de edad paleocena-eocena. Dichos niveles epiclásticos infrayacen discordantemente a secuencias volcánicas del Eoceno-Mioceno, que conforman el dominio volcánico del área. La cobertura cuaternaria está representada por depósitos fluvio-glaciares, aluviales y fluviales.

METODOLOGÍA

La metodología se ha desarrollado en cuatro fases. La primera comprendió la recopilación, revisión y clasificación de la información existente, elección de escala de trabajo, delimitación de la zona de estudio, interpretación de fotos aéreas y preparación de mapas preliminares que se usaron en los trabajos de inventario y cartografiado de procesos superficiales. En la segunda etapa se efectuó el inventario de lugares afectados por movimientos de ladera y cartografiado de procesos superficiales a escala 1/25,000. Durante el inventario se copiaron una serie de observaciones geológicas, estructurales y geotécnicas (Fidel y otros, 2006). En total se han inventariado 91 movimientos de ladera. La tercera etapa ha consistido en la preparación de información espacial con los datos obtenidos en las fases anteriores y finalmente, en la cuarta y última etapa, se ha realizado el análisis mediante SIG, empleando el método de combinación de factores del IGME (Laín y otros, 2005). La escala de trabajo ha sido 1/50,000. Los factores elegidos han sido la pendiente, litología, grado de fracturación, hidrogeología, tipos de movimientos de ladera, velocidad y volumen transportable por los procesos.

PENDIENTE

El mapa de pendientes de la cuenca se obtuvo como un gradiente de elevaciones del Modelo Digital de Elevación, basado en mapas topográficos con curvas de nivel cada 25 metros. Para este trabajo se diferenciaron cinco tipos de pendientes, muy baja, baja, media, fuerte y muy fuerte.

LITOLOGÍA, GEOTECNIA E HIDROGEOLOGÍA

La litología, geotecnia e hidrogeología, se ha considerado en la agrupación de tipos de rocas como unidades litológicas (Tabla 3). Para ello se ha tomado como base la información geológica actualizada al 2006 (Navarro y otros, 2006); información hidrogeológica proveniente de la "Caracterización hidrogeológica de la cuenca del río Jequetepeque, regiones de Cajamarca y la Libertad" (Vargas, 2007); así como datos geológico-estructurales y geotécnicos tomados en el campo. Las características geotécnicas correspondieron a resistencia de rocas y capacidad portante de suelos. Para evaluar la resistencia de las rocas se ha tomado como referencia el índice RMR (Rock Mass Ratio, tabla 1) de

Bieniaski (1989); y para estimar la capacidad portante de suelos el índice internacional CBR (California Bearing Ratio, tabla 2).

Tabla 1. Valoración de la calidad de la roca en función del RMR (Bieniaski, 1989)

RMR	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20
Calidad de la roca	Muy buena	Buena	Regular	Mala	Muy mala

Tabla 2. Valoración de la capacidad portante de suelos en función del índice CBR (modificado de Laín et al, 2005)

CBR	> 80	80 - 40	40 - 10	< 40
Capacidad portante del suelo	Muy buena	Buena	Media o regular	Mala

Tabla 3. Características litológicas, hidrogeológicas y geotécnicas de las unidades litológicas de la cuenca Llaminchán.

Grupo	Unidad Litológica	Unidad Geológica	Tipo de material	Hidrogeología	Capacidad portante (CBR)	Calidad (RMR)
Depósitos Superficiales	DS1	Depósitos aluviales	Depósitos aluviales	Acuitardo semiconsolidado	Regular a buena	
	DS2	Depósitos de remoción	Depósitos de remoción			
	DS3	Depósitos eluviales	Depósitos eluviales	Acuífero poroso no consolidado	Regular a mala	
	DS4	Depósitos fluviales	Depósitos fluviales		Mala	
	DS5	Depósitos fluvio-glaciares	Depósitos fluvio-glaciares		Regular a mala	
Rocas Sedimentarias	RS1	Formación Farrat	Areniscas cuarzosas	Acuífero fisurado sedimentario		Mala a regular
	RS2	Formación Quilquiñan-Mujarrum, Chulec, Pariatambo y Yumagual	Lutitas, limos, calizas y margas.	Acuitardo sedimentario		Regular a buena
	RS3	Formación Inca	Areniscas y lutitas ferruginosas.			regular
	RS4	Formación Cajamarca	Calizas	Acuífero kárstico		Mala a regular
Rocas Volcánicas	RV1	Secuencia Chilete, evento 1	Flujos lávicos y subvolcánicos andesíticos.	Acuitardo volcánico		Buena a muy buena
	RV2	Secuencia Chilete 1 fracturada	Lava andesítica fracturada y alterada.	Acuífero fisurado volcánico		mala a regular
	RV3	Secuencias Chilete2, El Suro y Huayquisongo 1	Flujos piroclásticos dacíticos y andesíticos de bloques, pómez, cenizas y lahares.	Acuitardo volcánico		
	RV4	Secuencia Huayquisongo 7	Flujos piroclásticos dacíticos de bloques y cenizas con fragmentos líticos.			
	RV5	Secuencias Huayquisongo 2 y 3	Flujos piroclásticos dacíticos y riolíticos de pómez y cenizas.			
	RV6	Secuencia San Pablo	Depósitos volcanoclásticos de flujos de cenizas intercalados con capas de caliza y lahares.	Acuífero fisurado volcánico		regular a buena



Foto 1. Deslizamiento rotacional que afecta tramo de carretera Santa Rosa de Unanca-Llanavaco.

un tramo de la carretera Santa Rosa de Unanca-Llanavaco (Foto 1). Otro ejemplo de procesos de este tipo se registró frente a la mina Paredones donde se observó vestigios de un flujo de lodo de carácter excepcional en la quebrada San Nicolás (Foto 2).

Los movimientos de ladera de orden complejo representan un pequeño porcentaje del total de procesos observados y corresponden en su mayoría a movimientos sucesivos del tipo deslizamiento-flujo como el que se observó en el sector de Sarapacha, el cual es un evento antiguo, con poca probabilidad de reactivarse, si se mantienen las condiciones actuales del sitio.

TIPO DE MOVIMIENTOS OBSERVADOS

En la zona de estudio los movimientos de ladera observados son principalmente de orden simple (de fase aérea y terrestre) y complejos en menor porcentaje. Los procesos de orden simple y fase aérea están representados por desplomes y desprendimientos, como se pudo observar a lo largo de la carretera Chilete-San Bernardino, entre Chilete y La mina Paredones.

Los procesos de orden simple y fase terrestre están representados por deslizamientos, flujos y reptación de suelos, como los deslizamientos observados en Santa Rosa de Unanca que afectan

VELOCIDAD DE LOS PROCESOS OBSERVADOS

En el área de estudio se ha agrupado en tres grupos a las unidades litológicas de acuerdo a como se presentaron las velocidades de los movimientos de ladera en ellas (UNESCO - Working Party on World Landslide Inventory, 1995).

En el primer grupo se ha considerado a las unidades RS1, RS3, DS4 y DS5 (Tabla 1), que aparecen dispuestos en áreas de escasa pendiente y cuya velocidad es de lenta a moderada.

En el segundo grupo las velocidades varían de moderada a muy rápida y se ha considerado aquí



Foto 2. Flujo de lodo excepcional en la quebrada San Nicolás.

a las unidades: RS4, DS1, RV1, RV4 y RV6 (Tabla 1).

En el tercer grupo las velocidades son muy rápidas a extremadamente rápidas y se ha considerado a los materiales de las unidades DS2, DS3, RS2, RV2, RV3 y RV5 (Tabla 1).

VOLUMEN MOVILIZABLE POR LOS PROCESOS

De acuerdo al volumen de masa inestable que podría mobilizarse a causa de estos fenómenos, se ha subdividido a las unidades litológicas en dos grupos: Materiales con volúmenes movilizables muy pequeños a pequeños, los cuales corresponden a las unidades: RS1, RS2, RS3, RS4, RV1, RV3, RV4 y DS4; y materiales con volúmenes transportables pequeños a grandes, que agrupa al resto de materiales: DS1, DS2, DS3, RV2, RV5 y RV6.

ANÁLISIS MEDIANTE SIG

El análisis mediante SIG, empezó transformado la información de vectorial a matricial para poder hacer las operaciones algebraicas, debido a que en dicho formato sólo se pueden hacer operaciones de geoprocamiento. Luego, se construyó una matriz de susceptibilidad según los criterios del IGME adecuados a las características de la cuenca Llaminchán (Lain et al, 2005).

MATRIZ DE SUSCEPTIBILIDAD

Se utilizó para confrontar pendiente y agrupaciones litológicas y ponderar las diferentes combinaciones. El rango de valores usados en las ponderaciones es de 1 a 5 para identificar con facilidad el grado de susceptibilidad (1 es “muy baja” y 5 “muy alta”; Tabla 2). Por ejemplo, si consideramos la unidad RS1 y una pendiente menor de 10 grados, el valor asignado sería 1 porque en ese rango de pendiente es difícil que se desarrollen movimientos de ladera. Posteriormente, esta matriz se volcó en los mapas en formato *raster* para realizar mediante SIG el álgebra de capas e integrar las coberturas de unidades litológicas y pendientes con sus respectivos atributos de identificación. Como resultado y previa reclasificación se obtuvo el *mapa de susceptibilidad a los movimientos de ladera* (Fig. 2). En la tabla 2 se muestra la matriz síntesis asociada a dicho mapa.

MATRIZ DE SUSCEPTIBILIDAD		UNIDADES LITOLÓGICAS									
		RS3	DS4	RV6	RV4, DS5	RS1, RV1, RV5, DS3	RV3	RS4, RV2	DS1	RS2	DS2
PENDIENTES	< 10°	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
	10 a 20°	1	1	2	1	2	3	3	2	3	2
	20 a 40°	1	2	2	2	3	3	4	3	3	4
	40 a 60°	2	3	3	4	4	4	4	4	5	5
	> 60°	3	4	4	5	5	5	5	5	5	5

Tabla 2. Matriz de susceptibilidad a los movimientos de ladera en la cuenca Llaminchán.

RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo al mapa de susceptibilidad a los movimientos de ladera, se puede decir, que un 70 % del territorio de la cuenca presenta una susceptibilidad baja a media. En el 30 % restante la susceptibilidad

varía de media a muy alta y corresponde a terrenos donde el material es de mala calidad como es el caso de los volcánicos de las unidades RV3 y RV4, una pendiente fuerte a muy fuerte y están en las márgenes de las quebradas tributarias al cauce del río. Muchas de las zonas de rupturas coinciden con zonas de fracturación y alteración o contacto entre las litologías mencionadas, así como a depósitos de eventos anteriores.

Las zonas con mayor susceptibilidad se encuentran en los cerros Calaquis y Llamadón, el flanco sur del cerro Callancas, el sector norte del poblado Santa Ana, la parte alta del sector Pueblo Libre-El Naranjo y la zona comprendida entre Chilete y la mina Paredones.

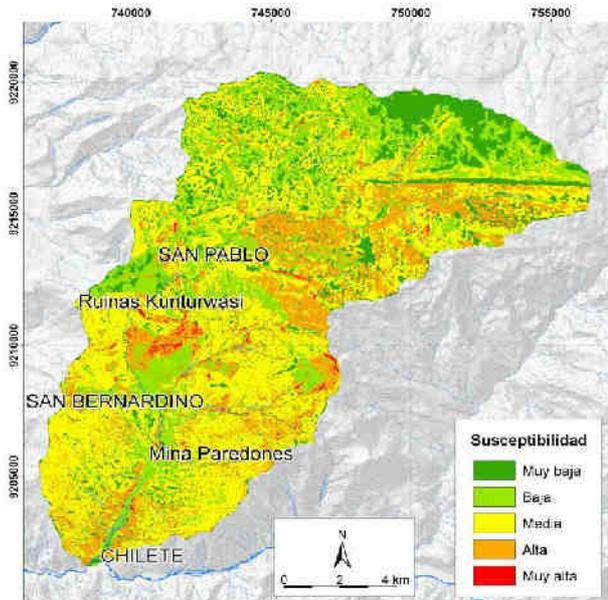


Figura 2. Mapa de susceptibilidad por movimientos de ladera

Los cerros Calaquis y Llamadón, están ubicados a 700 y 500 m al noreste de la ciudad de San Pablo y presentan alta susceptibilidad, debido a su fuerte pendiente y porque en sus faldas se tienen depósitos de deslizamientos muy antiguos, sobre un substrato volcánico constituido por tobas que en la zona se encuentran fracturadas con algunos niveles de lavas andesíticas intercaladas con sedimentos arcillosos, los que son fácilmente erosionable (tobas).

El cerro Callancas ubicado 1 km al este de San Pablo presenta una susceptibilidad muy alta por su fuerte pendiente y el intenso fracturamiento de las calizas.

La zonas ubicadas al norte de Santa Ana (ladera sur del cerro Casahocro) y en la parte alta del sector Pueblo Libre-El Naranjo (límite este de la cuenca) presentan muy alta susceptibilidad porque son terrenos de fuerte pendiente, constituidos por antiguos depósitos de remoción que cubren un substrato volcánico.

La zona ubicada a 1 km al sur de la mina Paredones, en ambas márgenes del río Llaminchán, presenta una susceptibilidad muy alta, debido a que el substrato está constituido por lavas andesíticas intensamente fracturadas y falladas.

CONCLUSIONES

El inventario y cartografiado de movimientos de ladera son herramientas que proveen de información confiable a los modelos de susceptibilidad a dichos fenómenos. El uso de una matriz para el análisis de la susceptibilidad es ventajoso debido a su breve tiempo en el procesamiento de datos espaciales y porque es costo-eficiente. Las bases de datos estandarizadas permiten optimizar el análisis de la susceptibilidad por movimientos de ladera mediante SIG.

La susceptibilidad a los movimientos de ladera en la cuenca Llaminchán, está relacionada directamente a las características geotécnicas de la zona. Así, las zonas con más alta susceptibilidad se encuentran al noreste de la ciudad de San Pablo (Cerros Llamadón y Calaquis), el flanco sur del Cerro Callancas, el sector norte del poblado Santa Ana, la parte alta del sector Pueblo Libre-El Naranjo (Ladera oeste del cerro Sojllasta) y la zona comprendida entre Chilete y la mina Paredones (laderas en ambas márgenes del río Llaminchán).

RECOMENDACIONES

Para optimizar la predicción del mapa de susceptibilidad a los movimientos de ladera se recomienda trabajar con geología y topografía de mayor detalle aunque la escala de presentación sea menor. Los encargados del análisis de susceptibilidad a procesos geológicos, deben ser geólogos especialistas en la materia con dominio en SIG. Para planificar la expansión urbana de los centros poblados en la cuenca, deberá tomarse en cuenta los resultados de este estudio. Finalmente, se recomienda hacer un estudio local de estabilidad de taludes en los cerros Llamadón y Calaquis y en la zona comprendida entre Chilete y la mina Paredones, por ser áreas de muy alta susceptibilidad a los movimientos de ladera que afectarían vías de acceso a los centros poblados de la cuenca.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las autoridades del IGME, INGEMMET y de la Red DESIR por el apoyo y facilidades brindadas durante la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- Ayala-Carcedo, F.; Olcina, J. 2002. Riesgos Naturales. Editorial Ariel, colección Ciencia, Barcelona, p. 1304.
- Cruden, M, Varnes, J. 1996. Landslide Types and Processes. En: Turner, A.K. y Schuster, R.L., 1996: Landslides: Investigation and Mitigation. Special Report 247. Transportation Research Board, National Research Council. National Academy Press, Washington, D.C. p. 675.
- Bieniawski, Z. 1989. Engineering Rock Mass Classifications. Wiley-Interscience Publication. 1989
- Fidel, I.; Olivares, P. 1994. Estudio geodinámico de la cuenca del río Jequetepeque. Boletín INGEMMET, Serie C. N° 10. Lima.

- Fidel, L., Zavala B. Nuñez, S. Valenzuela G. 2006. Estudio de riesgos geológicos del Perú Franja N° 4. Instituto Geológico Mínero y Metalúrgico. Serie "C" Geodinámica e Ingeniería Geológica. Boletín N° 29. 383 pgs. 11 figs., 10 gráfs., 49 cdrs., 136 fots., 19 mapas
- INRENA-PEJEZA 2004. Plan de ordenamiento, manejo ambiental y desarrollo social en la cuenca media y alta del río Jequetepeque para la protección del embalse Gallito Ciego. 3 vol. Lima.
- Lafn, L. Llorente, M Díez, A. Rubio, J. Maldonado, A. Galera, J. Arribas, J. 2005. Mapas de peligrosidad geológica en el termino municipal de Albuñol. Publicación IGME. Granada, España .162 páginas. Inédito.
- ONERN 1988. Plan de ordenamiento Ambiental de la cuenca del río Jequetepeque para la protección del reservorio Gallito Ciego y del valle agrícola. Lima. 313 páginas.
- Navarro, P., Monge, R. Y Flores, C. 2006. Volcanismo Cenozoico (Grupo Calipuy) y su Asociación con los Yacimientos Epitermales, de la Región Norte del Perú. INGEMMET. Lima. Inédito
- UNESCO - Working Party on World Landslide Inventory. 1995. A suggested method for describing the rate of movement of a landslide. Bull. Inter. Assoc. Engng. Geol. 52:7 p. 5-78.
- Vargas, V. 2007. Caracterización hidrogeológica de la cuenca del río Jequetepeque, regiones de Cajamarca-La Libertad. Tesis de grado. Ingeniería Geológica. Universidad Nacional de Cajamarca. Cajamarca, Perú.