

## **INCIDENCIA MORFOAMBIENTAL DE LOS PROCESOS GRAVITACIONALES EN VOLCÁN Y SUS ALREDEDORES (JUJUY, REPÚBLICA ARGENTINA)**

**ARMATA, Ana Carolina<sup>1</sup> y RIVELLI, Felipe Rafael<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Salta. Facultad de Ciencias Naturales, Cátedra de Geomorfología.

<sup>2</sup>Profesional Independiente.

aluvionamiento@gmail.com

### **RESUMEN**

Volcán se encuentra en una zona de la quebrada de Humahuaca donde los diferentes procesos morfogenéticos son activos e inciden en la modificación del relieve y ambiente. Los procesos gravitacionales juegan un papel preponderante en la morfogénesis y son los responsables de importantes cambios en el paisaje y a la vez de consecuencias ambientales negativas. Por ello se analiza la influencia de la remoción en masa directa o indirecta en la localidad de Volcán, la interrelación con otros procesos morfogenéticos que inciden en el área. El estudio se realizó en base a observaciones in situ, análisis comparativo de imágenes satelitales y evaluando las consecuencias de los diferentes episodios en que ocurrieron los procesos gravitacionales. Para algunos casos, en función de la información lograda se plantean opciones de obras destinadas a disminuir la incidencia de los procesos gravitacionales en el área de influencia de Volcán.

**Palabras claves:** procesos gravitacionales - incidencia morfogenética - impacto ambiental - obras correctivas.

### **MORPHO-ENVIRONMENTAL INCIDENCE OF GRAVITATIONAL PROCESSES IN VOLCAN AND ITS SURROUNDINGS (JUJUY, REPÚBLICA ARGENTINA)**

### **ABSTRACT**

Volcano is located in an area of the Quebrada de Humahuaca where the different morphogenetic processes are active and affect the modification of the relief and environment. Gravitational processes play a preponderant role in morphogenesis and are responsible for important changes in the landscape and negative environmental consequences. Therefore, the influence of the direct or indirect mass removal in the Volcán locality, the interrelation with other morphogenetic processes that affect the area, is analyzed. The study was carried out based on in situ observations, comparative analysis of satellite images and evaluating the consequences of the different episodes in which the gravitational processes occurred. For some cases, depending on the information obtained, work options are proposed to reduce the incidence of gravitational processes in the area of influence of Volcán.

**Keywords:** gravitational processes - morphogenetic incidence - environmental impact - corrective works.

## **Introducción**

El pueblo de Volcán, emplazado en la quebrada de Humahuaca, se ubica en un sitio inapropiado, donde los diferentes procesos gravitacionales que forman parte de la morfogénesis del lugar influyen negativamente generando múltiples daños en dicha localidad.

Volcán se asienta sobre depósitos de origen lacustre, en la desembocadura de la quebrada de Los Filtros, donde se generó el flujo denso que afectó a su población e infraestructura en enero de 2017 y en las cercanías de arroyo del Medio, haciéndolo vulnerable al pueblo que se ve afectado con frecuencia en forma directa o indirecta por los procesos gravitacionales que ocurren en los alrededores.

Los deslizamientos traslacionales y rotacionales ocurren con frecuencia en los sedimentos lacustres sobre los cuales se construyó Volcán como consecuencia de la profundización del río Grande, debido a la erosión retrocedente que se observa en este tramo del mismo. Ello da lugar a una ampliación en la sección transversal de la parte superior y la reducción en la inferior, esto último debido a la acumulación de sedimentos, generando un riesgo permanente para las viviendas y obras de infraestructuras.

Dichos procesos gravitacionales inciden directamente en la localidad de Volcán, afectándola en mayor o menor grado cada vez que se produce un deslizamiento.

Los flujos densos (Sharpe, 1960), también conocidos como coladas de barro o volcanes según denominación de los lugareños ocasionan un nivel mayor de daños y pérdidas económicas, se originan en los alrededores del pueblo de Volcán. Desplazando cuando ocurren volúmenes importantes de materiales a velocidades altas no medidas, transformándolos de esa manera en un proceso de alto riesgo con efectos negativos en lo referido a la cuestión morfo genética y ambiental.

La quebrada de los Filtros, ubicada al noroeste de Volcán es la de mayor incidencia y la que más daños ocasiona por la frecuencia con la que se suceden los flujos densos, el último de ellos en enero de 2017, impactando en forma directa en el pueblo.

Los flujos densos que se generan en arroyo del Medio, al sur de Volcán, tienen baja incidencia sobre dicha localidad, salvo ocasiones cuando movilizan volúmenes de sedimentos que superan la capacidad del canal de descarga y a causa de ello se desvía la masa detrítica provocando inundaciones en el pueblo por el cierre del río Grande, tal cual lo ocurrido en el año 1945 (Rodríguez Pasquini, 2011).

En este caso el proceso gravitacional incide en forma indirecta en el pueblo de Volcán, no como consecuencia del material que desplaza, sino de las derivaciones que ocurren a causa del mismo.

### **Área de estudio**

La localidad de Volcán se encuentra 41,9 km de la capital, San Salvador de Jujuy, en el extremo sur de la quebrada de Humahuaca a 2.078 msm (Fig. 1). La ubicación geográfica es 23° 55' de latitud S y 65° 28' de longitud W.

A Volcán se accede por medio de la ruta nacional N° 9; habilitada durante todo el año, salvo cuando ocurren cortes esporádicos que en algunos veranos alcanzaron los cuatro a cinco días de interrupción que en su mayoría coinciden con los períodos de lluvias como consecuencia del accionar de los flujos densos y deslizamientos.

El clima del área de estudio según la clasificación de Köppen, corresponde al de una estepa fría y seca, (BSk/Cw), caracterizado por escasas precipitaciones pluviales concentradas en el periodo estival y temperatura media anual inferior a los 18 °C (Buitrago y Larran, 1994).

El cono de arroyo del Medio actúa en la quebrada de Humahuaca como barrera orográfica impidiendo que los vientos húmedos del sur avancen hacia el norte dando lugar de esa manera a un menor registro de precipitaciones en las diferentes localidades ubicadas aguas arriba del mismo.

En el área de estudio las precipitaciones de carácter torrencial, se concentran en los meses de verano, período en el que se registran elevadas temperaturas lo cual determina un menor aprovechamiento del agua a causa de la elevada evapotranspiración.

Los alrededores de la zona estudiada están ubicados en una extensa depresión topográfica, en este caso la quebrada de Humahuaca, con todas las características del macro modelado o relieve que corresponde a la región morfo estructural de Cordillera Oriental.

Volcán está limitado al este por las cumbres de la sierra Altos de Volcán, destacándose los cerros El Manzano, El Cardenal, de 3.237 y 3.335 m de altitud respectivamente. El límite oeste de Volcán está determinado (de sur a norte) por los cerros Morado (4.385 msm), Pabellón (4.584 msm), Penorco (4.569 msm), Vallecito o Córdoba (3.478 msm), y las cumbres de dos cerros innominados ubicados en el abra de Las Sillas y en las terrazas aluviales de El Antigal, a más de 4.000 m de altura, todos ellos forman parte de la sierra del Chani.

La Geología en este tramo de la quebrada de Humahuaca, se caracteriza por el predominio de rocas metamórficas correspondientes al Precámbrico, aflorantes en los cordones montañosos que delimitan la depresión orográfica.

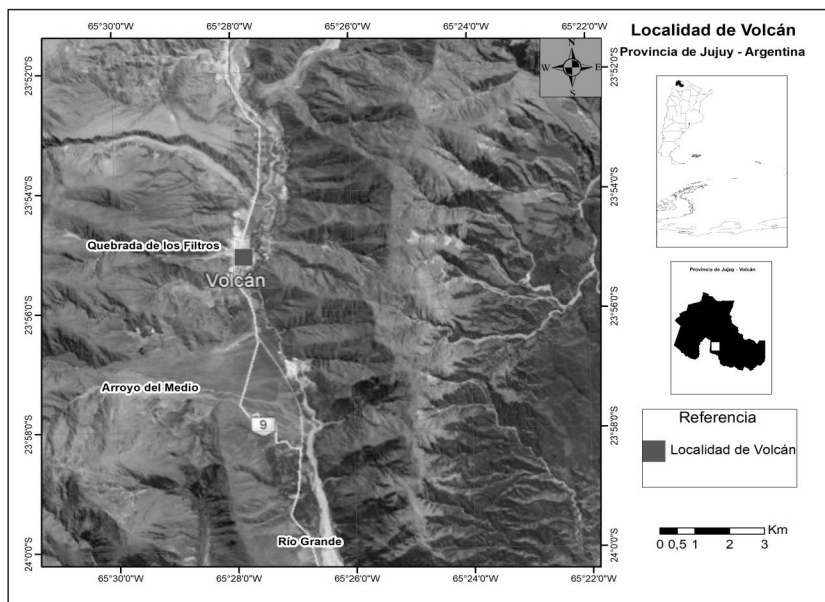


Figura. 1: Localización geográfica del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Dichas rocas como consecuencia de su antigüedad están caracterizadas por un marcado diaclasamiento que facilita la meteorización física, permitiendo la generación de material suelto que se acumula en las laderas o en el fondo de las depresiones topográficas, todo lo cual favorece a posteriori el accionar de los procesos gravitacionales.

En el cordón montañoso que delimita la quebrada de Humahuaca al occidente el esquema geológico debido a la tectónica y la presencia de rocas con edades y resistencia diferentes es más complejo, observándose afloramientos de cuarcitas, metamorfitas y areniscas. Todas ellas con distintos grados de conservación por lo que responde de igual manera a los procesos morfogenéticos que inciden en el modelado del área estudiada.

El Cuaternario está representado por depósitos de materiales recientes, generados por diferentes procesos morfogenéticos, entre los cuales se pueden mencionar el de origen lacustre sobre los cuales se emplazó el pueblo de Volcán y que se extienden aguas arriba del río Grande en una distancia aproximada a los 10 km hasta las cercanías al pueblo de Tumbaya.

A lo mencionado deben añadirse los distintos depósitos de detritos resultados de la meteorización, sean los generados in situ por el accionar del termoclastismo sobre los diferentes afloramientos rocosos o bien de los afectados nuevamente por la desagregación en el lugar donde se acumularon.

Desde el punto de vista de la morfogénesis eólica corresponde citar las acumulaciones de arena que forman las dunas estabilizadas situadas al noreste de Volcán, actualmente en proceso de desestabilización y movilización.

Los diferentes depósitos de sedimentos originados por la actividad fluvial y gravitacional conforman una importante fuente de suministro para nuevos flujos, quienes durante su desplazamiento los remueven e incorporan como carga adicional.

### **Relieve y morfogénesis**

La meteorización física por intermedio del termoclastismo ocupa un lugar destacado entre los procesos geomorfológicos responsables de la morfogénesis y una marcada incidencia para la evolución del relieve, según lo observado en la zona de estudio.

La amplitud térmica diaria, prácticamente durante todo el año, favorece la desagregación de las rocas y como consecuencia de ello la generación de material suelto en forma continua.

El escurrimiento concentrado facilitado por la acumulación de detritos, genera cárcavas y surcos de erosión lo que permite de esa manera el desplazamiento de materiales sueltos hacia los niveles más bajos del relieve positivo, aportando al sistema fluvial un volumen mayor de sedimentos.

La morfogénesis fluvial tiene importancia en el área de Volcán fundamentalmente por el accionar del río Grande y sus tributarios, que aportan carga en forma sistemática.

El río Grande al igual que la mayor parte de los fluvios que se encuentran en las provincias de Salta y Jujuy están caracterizados por aumentar la altura de su lecho a causa de la acumulación de sedimentos, fenómeno conocido como aluvionamiento, salvo desde la desembocadura de arroyo del Medio hasta las proximidades de Tumbaya, debido ello a cuestiones antrópicas por modificación de su cauce, dando lugar a la profundización por erosión retrocedente.

La morfogénesis gravitacional tiene una notable incidencia e impacto ambiental en el pueblo de Volcán y sus alrededores, a través de los diferentes procesos gravitacionales que ocurren en el área de estudio (Fig. 2).

La falta de información de datos estadísticos relacionados con la morfogénesis que caracteriza al área de estudio, en particular los referidos a la remoción en masa,

impiden cuantificar y valorar la incidencia que tienen en el modelado y evolución del relieve, imposibilitando planificar y calcular las posibles obras requeridas para atenuar y controlar a dichos procesos morfogenéticos y de esa manera reducir al máximo el efecto e incidencia negativa que tienen para Volcán y todas las obras de infraestructura del área.

En los alrededores de Volcán y área de influencia, el accionar de los procesos gravitacionales puede ser considerada según la clase a la cual corresponden (Varnes, 1978 y SEGEMAR, 2007) y a la vez considerando la relación que tienen con el pueblo, vale decir si es directa o indirecta, todo lo cual da lugar a una situación compleja e interrelación entre los mismos, aspecto que hace más complicado el llevar adelante planes o programas de mitigación.

Como consecuencia de la erosión retrocedente y profundización en el cauce del río Grande, ambas márgenes conformadas por taludes prácticamente verticales correspondientes a depósitos lacustres, se generan deslizamientos rotacionales dando lugar a una serie de inconvenientes, como la pérdida de viviendas, eliminación de terrenos dedicados a la agricultura y obras de infraestructura, ubicadas en las proximidades de la zona de riesgo.

Si bien es cierto que al día de la fecha no ocurrieron, existe la posibilidad y están dadas las condiciones para que se produzca el fenómeno conocido como *landslides dams* (Cencetti y Rivelli, 2011), caracterizado por generar un embalse aguas arriba del cierre debido a la acumulación de los materiales que desplazó dicho proceso gravitacional, dando como consecuencia de ello a posteriori y en forma inmediata a la generación de un flujo denso.

Los deslizamientos rotacionales mencionados inciden y afectan en forma directa a la localidad de Volcán, ocasionándole a la misma múltiples daños y pérdidas económicas, no así los traslacionales que ocurren en las serranías del este, en muchos casos responsables de generar flujos densos.

Con respecto a los diferentes procesos gravitacionales que se originan en las serranías del este, flujos densos, deslizamientos rotacionales y traslacionales no generaron inconveniente alguno a la localidad de Volcán debido a que la depresión topográfica por donde escurre el río Grande constituye una excelente barrera natural que impide a los sedimentos desplazados ingresar al área urbanizada y o perimetral del pueblo (Fig. 3).

Ante el eventual desplazamiento de los materiales removido por cualquiera de los procesos de remoción antes mencionados y que se acumularan en el lecho del río Grande, sobre todo en aquellos sitios donde la sección transversal es reducida, existe el riesgo de formarse un *landslides dams* lo cual en caso de producirse generaría una sumatoria de efectos negativos, entre los cuales podrían darse un flujo denso desplazándose por

el cauce, potenciar los deslizamientos rotacionales de las márgenes, implicando ello el aporte de materiales al sistema fluvial y a la vez consecuencias imprevisibles para el área urbanizada.



Fig. 2: Vivienda afectada por el flujo denso de enero 2.017 (izquierda).

Fig. 3: Panorámica donde se aprecian los flujos densos en ambos cordones montañosos que delimitan la quebrada de Humahuaca en la zona de Volcán (derecha).

El efecto negativo de los deslizamientos analizados podría ser aminorado mediante obras sencillas, de costo reducido y bajo impacto ambiental, esto último de fundamental importancia atento a la sumatoria de acciones que a diario se observan.

Un análisis en forma específica y detallada merece lo relacionado con el comportamiento del denominado arroyo de Los Filtros, responsable de la tragedia ocurrida en enero de 2.017 y otras acontecidas en el pasado.

La cuenca del arroyo de Los Filtros, situada al oeste de Volcán y sobre cuyo cono se edificó parte del pueblo, se caracteriza por su inestabilidad, donde los deslizamientos traslacionales son frecuentes (Fig. 4) y en muchos casos generadores de landslides dams responsables de que se generen flujos densos como los del 2.017, provocando no solamente pérdidas económicas sino también de vidas humanas, con un alto impacto ambiental, tema sobre el cual no se dice absolutamente nada.

El origen de los flujos densos que se generan en la quebrada de Los Filtros responde a un esquema definido desde el punto de vista morfogenético, con una secuencia precisa: deslizamiento traslacional – landslides dams – flujo denso, desplazando volúmenes importantes de materiales en cada evento.

El ocurrido en enero de 2.017 se estima que depositó en el área de Volcán sin contar la carga que alcanzó el cauce del río Grande y lo que se acumuló en la parte final de la depresión aproximadamente 1.500.000m<sup>3</sup>(Fig. 5).

Como consecuencia de ello fallecieron dos habitantes del pueblo, perdieron viviendas, campos dedicados a la agricultura y a la vez se produjeron daños en diferentes obras de infraestructura, sin contar la componente ambiental causada al igual que el impacto en el relieve y paisaje, donde el mismo resulta ser de suma importancia por tratarse de un recurso clave al ser la quebrada de Humahuaca un centro turístico.

Las obras que se realizan actualmente en el área afectada por lo ocurrido en la quebrada de Los Filtros no solo resultan inapropiadas sino también generadoras de un impacto mayor o superior al producido por el proceso gravitacional en sí mismo.



Fig. 4: Deslizamiento traslacional en la quebrada de Los Filtros (derecha).

Fig. 5: Cuenca arroyo de Los Filtros y parte del flujo denso de enero 2017 (izquierda).

Dichas obras no consideran un aspecto fundamental para el tratamiento de estos casos, la ejecución de barreras destinadas a la retención de sedimentos y de esa manera reducir el volumen de carga desplazada al igual que la velocidad del flujo, con lo cual gran parte de lo realizado resultará insuficiente.

En cuanto a la situación de arroyo del Medio y su relación como así también influencia en Volcán, no obstante la distancia que los separa es importante. Los flujos densos que se generan en la cuenca del curso mencionado influyen en forma indirecta en dicha localidad, no obstante ello constituye un alto riesgo para el pueblo.

Los flujos densos que se generan en arroyo del Medio se caracterizan por los volúmenes que desplazan, en una ocasión se cuantificó solo el material acumulado en el área de influencia de la entonces ruta nacional N° 9 alcanzando un volumen cercano a los 2.000.000 m<sup>3</sup>, valor que de ninguna manera corresponde a la masa total de sedimentos transportados en dicha oportunidad (Rivelli y Armata, 2018).

El cono mixto de arroyo del Medio muestra en su parte superior una serie de canales abandonados, distribuidos en forma irregular, por donde se desplazaban los flujos densos, uno de los cuales en el año 1.945 permitió que el material movilizado se



desplazara hacia el norte alcanzando el cauce del río Grande, generando el cierre del mismo y como consecuencia de ello la inundación del pueblo de Volcán, un ejemplo de acción indirecta del proceso gravitacional en consideración.

Lo mencionado puede repetirse con relativa facilidad, todo está supeditado al volumen de precipitaciones y a su vez como se distribuyan las lluvias, sea en forma puntual o areal posibilitando de esa forma que el flujo denso se desplace nuevamente hacia el norte por cualquiera de los canales existentes, permitiendo que el material involucrado alcance a la localidad de Volcán o incida en el comportamiento del río Grande.

Cabe destacar que la situación de arroyo del Medio es más que crítica en estos momentos debido al tiempo transcurrido sin que se produzcan nuevos flujos densos. Desde el 2.004 no registra actividad alguna, a ello debe añadirse que en estos últimos años se produjeron sendos deslizamientos dando lugar a dos grandes landslides dams que frente a una lluvia importante podrían generar flujos densos con facilidad y un volumen, aunque no cuantificado, significativo de material fácil para ser desplazado (Fig. 6).



Fig. 6: Landslides dams en arroyo del Medio.

## **Conclusiones**

El pueblo de Volcán está ubicado en un lugar inapropiado por su exposición al accionar de los procesos gravitacionales.

La remoción en masa constituye un riesgo que incide en forma directa o indirecta sobre el pueblo de Volcán, generando diferentes daños cuando se manifiestan.

Los flujos densos y los deslizamientos resultan ser los procesos gravitacionales más frecuentes y de mayor incidencia.

El accionar de los flujos densos es responsable del desplazamiento de materiales en volúmenes que provocan cambios o modificaciones en el relieve y a la vez generan impactos ambientales irreversibles.

Los procesos gravitacionales que afectan en forma directa a la localidad de Volcán se los pueden controlar y atenuar sus efectos negativos con obras apropiadas, sencillas y de bajo impacto ambiental.

Resulta de imperiosa necesidad el concretar obras multipropósitos destinadas a controlar el desplazamiento de materiales como consecuencia del accionar de los procesos gravitacionales para evitar más daños y pérdidas de las ya causadas.

Las obras que se realizan actualmente en Volcán con la supuesta finalidad de evitar que se repita lo ocurrido en enero de 2017 generan mayor impacto del que provocó el flujo denso mencionado.

## Bibliografía

- Buitrago, L. G., Larran, M. T. (1994). *El Clima de la Provincia de Jujuy*. Cátedra de Climatología y Fenología Agrícola, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Jujuy. San Salvador de Jujuy, República Argentina.
- Cencetti, C., Rivell, F. R. (2011). *Landslides dams induced by debris flows in Quebradadel Toro (Province of Salta)*. 5<sup>th</sup> International conference on Debris flow Hazards Mitigation Mechanics Prediction and Assessment. Padova, Italia. Pp 645-650.
- Rivelli, F. R., Armata, A. C. (2018). *Modificación del Paisaje en la Quebrada de Humahuaca (Jujuy – República Argentina)*. 1<sup>a</sup> Reunión Internacional, Intersecciones ciencia, arte y patrimonio. Buenos Aires, República Argentina.
- Rodríguez Pasquini, M. (2011). *Análisis geoambiental en la zona de la Quebrada de Coiruro, Quebrada de Humahuaca (Departamento Tumbaya, localidad de Volcán, Jujuy, República Argentina)*. Tesina de grado. Biblioteca Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta. Salta, República Argentina.
- SEGEMAR. (2007). *Movimiento en masa en la región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas*. Proyecto multinacional Andino: Geociencia para las comunidades Andinas. Servicio Nacional de Geología y Minería (SEGEMAR). Publicación Geológica Multinacional N° 4. 404 pp.
- Sharpe, C.F.S. (1960). *Landslides and related phenomena: a study of mass movements of soil and rock*. Pageant books, inc. 137pp.
- Varnes, D. J. (1978). *Slope Movement Types and Process*. Landslides Analisis and Control, Special Report. National Academy of Sciences, Washington, D.C., U.S.A.