

Ánalysis de susceptibilidad de flujos de detritos en el Parque Provincial Aconcagua, Mendoza, Argentina

Debris flows susceptibility analysis in the Provincial Aconcagua Park, Mendoza, Argentina

María Alisa Alvarez ¹, Leandro Mastrantonio ¹, Stella M. Moreiras ^{1,2*}

Originales: *Recepción*: 25/04/2018 - *Aceptación*: 21/12/2018

RESUMEN

Los flujos de detritos representan potenciales peligros geológicos que amenazan a la comunidad en el Parque Aconcagua. Estos procesos se generan en pendientes abruptas alcanzando grandes velocidades y volúmenes, siendo su principal causa histórica la saturación de los sedimentos o rocas a partir del deshielo en épocas estivales. En este trabajo se evalúa la susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos en dicha reserva en función de factores como litología, pendiente, altura, orientación de las laderas y presencia de vegetación. Estas variables se analizaron a través de superposición de mapas temáticos y un mapa inventario de flujos de detritos históricos en el entorno de un SIG. Se utilizó el modelo de base física SINMAP y métodos estadísticos de regresión logística y W_i , obteniendo diferentes mapas de susceptibilidad que fueron validados espacialmente con un mapa inventario de control. Todos los modelos presentaron buen desempeño, aunque SINMAP presentó diferencias en la zonificación con respecto a los modelos estadísticos, siendo la regresión logística la metodología más apropiada para la valoración de la susceptibilidad.

Palabras clave

peligrosidad espacial • factores condicionantes • flujos de detritos

-
- 1 Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Ciencias Agrarias. Alte. Brown 500. Luján de Cuyo. M5528AHB. Mendoza. Argentina.
 - 2 IANIGLA-CCT Mendoza. Av Ruiz Leal s/n. Parque Gral San Martín. Mendoza. Argentina. * moreiras@mendoza-conicet.gob.ar

ABSTRACT

Debris flows occurrence represents a potential geological hazard threatening community of the Aconcagua Park. These events are generated on steeper slopes reaching high velocities and great volume. Main historical cause of events is water saturation of sediments or rocks due to precipitation, snow thawing or permafrost degradation during warmer seasons. This paper focuses in the analysis of debris flow susceptibility considering conditioning factors such as lithology, slope, elevation, slope orientation and vegetation presence. These variables were analyzed through superposition of thematic maps and an inventory map of historical debris flows in a GIS environment. A physical model (SINMAP) and statistical methods of logistic regression and Wi were applied obtaining three different models spatially validated with inventory control map. The models showed good performance, even though the SINMAP shows differences in the zoning comparing with statistician ones, being logistical regression the more proper method for susceptibility assessment.

Keywords:

spatial hazard • conditioning factors • debris flows

INTRODUCCIÓN

Un flujo de detritos es un movimiento en masa, inducido generalmente por la saturación de agua (5), que incluye varios fragmentos de rocas de distintos tamaños, sedimentos, agua y aire (11). En general, estos procesos se caracterizan por un desplazamiento rápido y presentan comportamiento de un líquido viscoso, capaz de transportar cualquier objeto que se encuentre en su camino (6).

Los flujos de detritos se originan en zonas de pendientes abruptas, pero una vez generados, pueden movilizarse en pendientes muy suaves. Generalmente se canalizan en hondonadas del terreno, sectores deprimidos y hasta cursos fluviales dando lugar a morfologías diferentes (4). Suelen generar albardones durante su recorrido depositándose en la parte inferior de las laderas dando lugar muchas veces a abanicos aluviales. Su característica principal es su gran poder de transporte, debido a las grandes

velocidades que desarrollan, que hace a los flujos de detritos particularmente peligrosos. El material transportado puede desencadenar represamiento de cursos del río, los cuales pueden colapsar y producir serios daños aguas abajo.

Los impactos negativos que implican los flujos de detritos pueden ser reducidos mediante medidas de mitigación preventivas. La primera fase en la prevención es la identificación y caracterización del peligro (10).

El paso inicial para ello es la evaluación de la susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos, es decir, la probabilidad espacial de que ocurran flujos de detritos. El Parque Provincial Aconcagua forma parte del sistema de áreas Protegidas de la Provincia de Mendoza, Argentina (Ley 4807/83) recibiendo cada año una gran afluencia de visitantes. En la temporada 2007-2008 se registraron aproximadamente 7.000 visitantes (24).

En el área los flujos de detritos son muy activos y violentos, aunque en la actualidad se desconoce el comportamiento de estos procesos, su grado de actividad y el efecto negativo que podrían tener dentro de dicha reserva.

La principal causa de los flujos de detritos es la saturación de los materiales de las laderas durante el deshielo en la época estival. Rara vez estos flujos han sido reportados durante lluvias intensas de verano o asociados a sismos (16).

La peligrosidad asociada a estos eventos se ha visto concretada en hechos como arrastre de mulas, represamientos temporales de los ríos, etc. lo que resalta el gran riesgo de ubicar instalaciones vitales en los lugares más susceptibles a la ocurrencia de flujos de detritos (17).

En el presente trabajo se realiza un análisis regional de la susceptibilidad a flujos de detritos en el área del Parque Provincial Aconcagua con la hipótesis que dicha probabilidad espacial varía en función de factores condicionantes del terreno. Dicho análisis se realizó en el entorno de Sistemas de Información Geográfica comparando diferentes modelos estadísticos y uno de base física (SINMSP). Con ello, se generó una zonificación del área en función del grado de susceptibilidad a dichos procesos naturales siendo una herramienta de planificación y elaboración de estrategias para contribuir a evitar la ocurrencia de desastres.

Cabe destacar que se han considerado las zonas de arranque u origen de los flujos de detritos pero no se han contemplado sus trayectorias, variable difícil de evaluar mediante modelos estadísticos y que no constituye un parámetro a ser evaluado en el presente trabajo.

Área de estudio

El Parque Provincial Aconcagua se emplaza en el Departamento Las Heras,

Mendoza, Argentina (figura 1, pág. 180), entre los 70°07' y 69°45' O y 32°35' y 32°48' S, en la provincia geológica de la Cordillera Principal en los Andes Centrales. Abarca una superficie aproximada de 71.000 ha. y alturas entre los 1.700 y los 6.900 m s. n. m., con pendientes de hasta 80°, predominan las laderas con orientaciones oeste y sureste.

La vegetación es escasa, dominando comunidades con fisonomía de matorrales, estepas, pastizales y praderas. La cobertura es baja excepto en zonas de vegas. Abarca dos cuencas principales, la cuenca del río Vacas y la del río Horcones. Durante la época estival, los cursos de estos ríos incrementan su caudal debido al aporte producto de la fusión de nieve y glaciares. Se observan grandes variaciones de los registros climáticos en cortos recorridos y periodos.

Según Koeppen (1931) el clima del área corresponde a Tundra entre los 2.700 y 4.100 m s. n. m., y a cotas superiores a clima Polar de hielos eternos donde la temperatura media mensual nunca supera los 0°C y el suelo permanece congelado todo el año. Los valores de precipitación media anual para la zona llega a 500 mm en los sectores más altos ocurriendo principalmente en el periodo invernal en forma de nieve (18).

El Parque Aconcagua pertenece a la región morfo-estructural de Cordillera Principal donde predominan las rocas de edad mesozoica representadas por sedimentitas marinas, depósitos epiclásticos y vulcanitas jurásicas-cretácicas (18). El complejo volcánico Aconcagua de edad terciaria aflora también en la región y las vulcanitas permotriásicas del Grupo Choiyoi (21). Estructuralmente la región pertenece a la faja plegada y corrida del Aconcagua con una serie de imbricamientos vergentes al oriente (22).

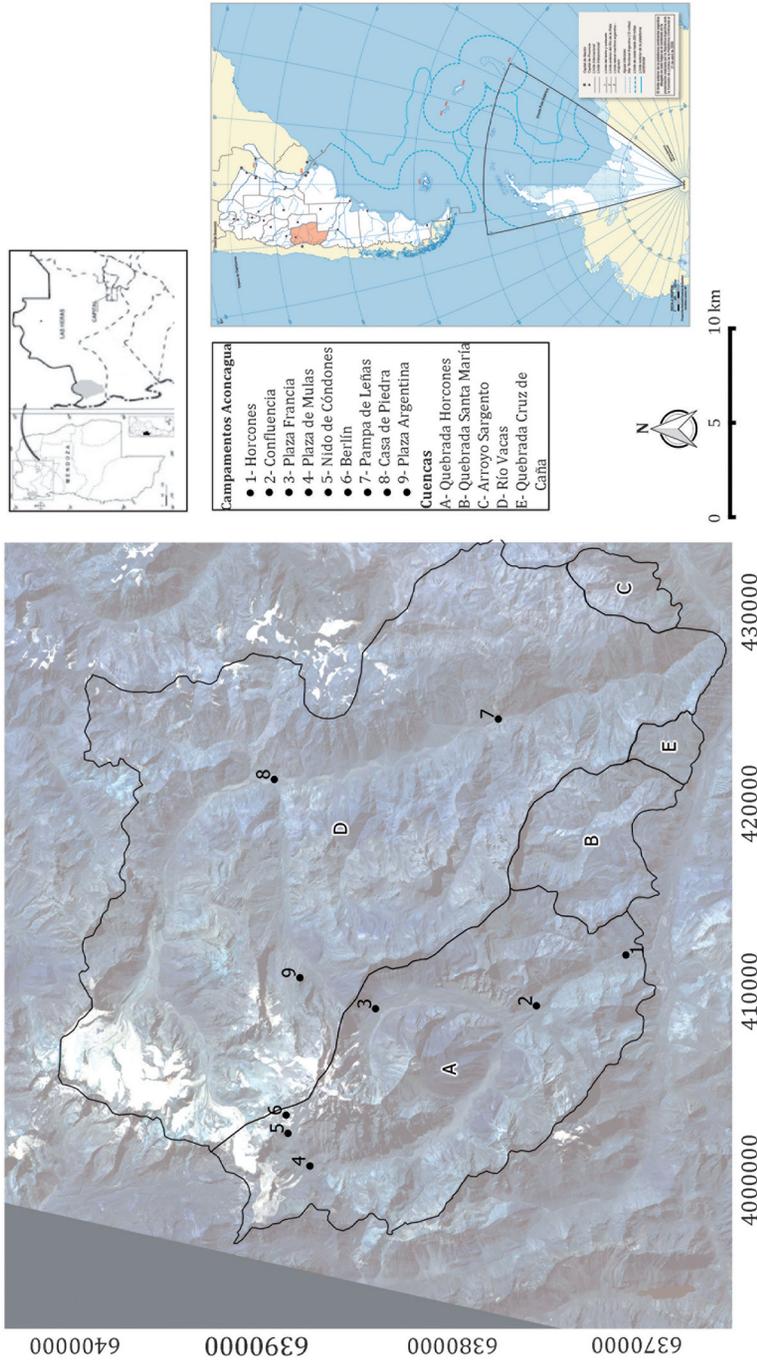


Figura 1. Ubicación del área de estudio, cuencas principales y campamentos del Parque Aconcagua.

Figure 1. Location of the study area, main basins and Aconcagua Park camps.

MATERIALES Y MÉTODOS

Inventario de flujos de detritos y factores condicionantes

Se digitalizaron los puntos correspondientes a la zona de iniciación de cada flujo de detrito histórico del mapa inventario realizado previamente (23) y actualizando el mapa original (17).

Los puntos correspondientes a las zonas de iniciación de los flujos de detritos se digitalizaron a partir de una imagen ALOS georreferenciada del 2010 (GeoTIFF) con resolución espacial de 10 m y tiene un nivel de procesamiento de falso color compuesto. Así el mapa inventario a escala 1:250.000 muestra un total de 923 puntos de inicio. Aleatoriamente se seleccionaron 766 puntos para la ejecución de los modelos, separando el resto para el proceso de validación espacial de los resultados.

Posteriormente se seleccionaron las variables que se consideran condicionantes y determinantes de la susceptibilidad de los flujos de detritos en el área de estudio. Estas son: litología, elevaciones, pendientes, orientaciones de laderas y vegetación. El mapa litológico empleado se basó en el realizado previamente (18). El modelo digital de elevaciones (MDE) se descargó del sitio <http://wist.echo.nasa.gov> con 30 m de resolución (WGS 84/EGM 96). Las pendientes y orientaciones de ladera se derivaron a partir del procesamiento del MDE.

El mapa de vegetación empleado es el elaborado por Van Westen (1997).

El procesamiento de la información geográfica fue realizado mediante el empleo de Arc View 3X y de gvSIG 1.12. Para el análisis estadístico se utilizó el programa Infostat Profesional (8).

Modelos de evaluación de susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos

Para el análisis de la probabilidad espacial de ocurrencia de flujos de detritos se aplicaron el modelo de base física SINMAP y dos modelos de base estadística, Wi de Van Westen y regresión logística.

SINMAP (20) calcula y asigna un índice de estabilidad de taludes en base a información geográfica, principalmente MDE. Requiere como datos de entrada el mapa inventario de eventos y el MDE. A partir de este último se derivaron la pendiente y un índice de humedad topográfica.

Se utilizó una región de calibración única, es decir que los parámetros: fricción del suelo (ϕ), transmisividad (T), cohesión del suelo por el sistema radical (C) y recarga del agua (R) fueron utilizados por defecto aplicando los valores predefinidos por el modelo ya que no existe información detallada respecto de la variabilidad de estos parámetros en el área de estudio.

El modelo establece seis clases de estabilidad en función de los valores que tome el índice de estabilidad (tabla 1): estable, moderadamente estable, baja estabilidad, baja inestabilidad, inestabilidad media y alta inestabilidad. Estas categorías fueron utilizadas en los demás modelos para poder compararlos.

Tabla 1. Clases de estabilidad para el modelo SINMAP.

Table 1. Stability classes for the SINMAP model.

Condición	Clase	Predicción de estado
$SI > 1,5$	1	Estable
$1,5 > SI > 1,25$	2	Moderadamente estable
$1,25 > SI > 1,0$	3	Baja estabilidad
$1,0 > SI > 0,5$	4	Baja inestabilidad
$0,5 > SI > 0,0$	5	Inestabilidad media
$0,0 > SI$	6	Alta inestabilidad

El índice W_i (27), es igual al logaritmo natural de la densidad de flujos de detritos para una clase sobre la densidad de flujos de detritos para el área total de estudio (ecuación 1). De esta forma se obtuvo el peso asignado a cada una de las clases de las variables analizadas. Posteriormente se superpusieron los mapas temáticos con los pesos asignados a cada una de las clases y se obtuvo el índice de susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos (ISFD) mediante la sumatoria de estas capas (ecuación 2).

$$W_i = \ln (F1/F2) \quad (1)$$

$F1$ = Densidad de flujos para cada clase = N° de flujos para cada clase/ Área de cada clase

$F2$ = Densidad de flujos para el área de estudio = N° de flujos totales/ Área total analizada

$$ISFD = Litología_w + Altura_w + Pendiente_w + Orientación_w + Vegetación_w \quad (2)$$

donde:

$Litología_w$ = coeficiente W_i de la variable Litología

$Altura_w$ = coeficiente W_i de la variable altura

$Pendiente_w$ = coeficiente W_i de la variable pendiente

$Orientación_w$ = coeficiente W_i de la variable orientación

$Vegetación_w$ = coeficiente W_i de la variable vegetación

El análisis de regresión logística se aplicó para describir la relación entre la presencia o ausencia de flujos de detritos y el conjunto de variables independientes que se tuvieron en cuenta en este estudio.

Se realizó un muestreo de puntos de ausencia de flujo de detrito, a partir de la generación de un vector de puntos de 766 puntos de distribución aleatoria en la

zona de ausencia de flujos. Se generó una base de datos con la información de alturas, pendientes, orientación, litología y vegetación para cada punto de ausencia y presencia de flujo de detrito. Para profundizar en la interpretación de los resultados se estimaron los odds-ratio o *coeficiente de probabilidades*.

Sea Y variable respuesta dicotómica tal que Y=1 representa presencia de flujo de detritos, Y=0 representa ausencia de flujo de detritos,

$$Y = \text{logit}(p) = \ln(p/(1-p)) = C0 + C1X1 + C2X2 + \dots + CnXn$$

donde:

p = probabilidad que la variable dependiente Y tome valor 1

$p/(p-1)$ = cociente de chances

C0 = intercepto

Constantes C1, C2, ..., Cn = miden la contribución de las variables independientes X1, X2, ..., Xn a la variación de Y.

El método está bien detallado en trabajos previos (26, 27).

Finalmente, los mapas de susceptibilidad obtenidos fueron validados espacialmente mediante la superposición de dichos mapas con el mapa inventario de flujos de detritos de control.

RESULTADOS

Mapa inventario de flujos de detritos

En la figura 2 (pág. 183), se observa el mapa inventario de flujos de detritos para el área del Parque Provincial Aconcagua, digitalizado a partir del inventario de Randis (2012).

Se representan las zonas de iniciación de los flujos de detritos mediante puntos.

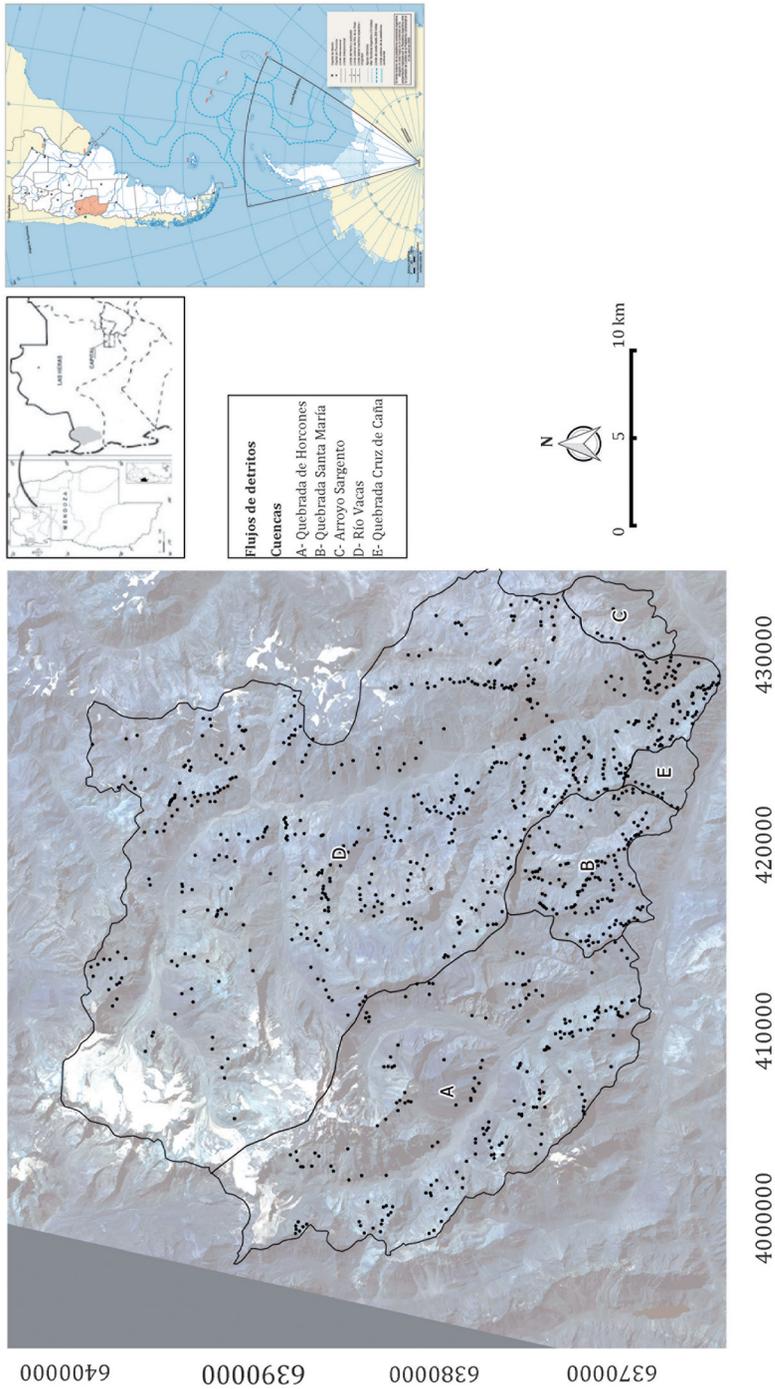


Figura 2. Inventario de flujos de detritos representados como puntos en sus zonas de iniciación.
Figure 2. Inventory of debris flows represented as points in their zones of initiation.

Evaluación de la susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos

Modelo SINMAP

El modelo clasificó el 51% del área como de baja inestabilidad, que corresponde a un escenario pesimista y con probabilidad de ocurrencia de flujos. Justamente la mayoría de los puntos del inventario se encuentran en esta categoría (65%). A su vez, el modelo clasifica un 8% del área como inestabilidad media y un 1% como inestabilidad alta. Las categorías de mayor estabilidad se encuentran representadas en el área de estudio en un 17% para estable, 8% para moderadamente estable y baja estabilidad en un 14,7%.

El mapa de susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos para el P.P. Aconcagua resultado de la aplicación del modelo SINMAP, y el histograma con los porcentajes de superficie para cada categoría de estabilidad se presentan en la figura 3A (pág. 185).

Modelo Wi de Van Westen

Según el índice Wi las litologías más susceptibles son las formaciones la Manga, Granito Cruz de Caña y Alto Tupungato; mientras que las menos susceptibles fueron Complejos Volcánico Aconcagua y los depósitos aluviales cuaternarios.

Las pendientes fuertes (16°-35°) y muy fuertes (35°-55°) son las más susceptibles a generar flujos. Esto puede deberse a que a pendientes mayores la cobertura detrítica es prácticamente inexistente y predominan otros procesos como caídas de rocas.

Con respecto a las orientaciones, las laderas N y NE, es decir, las que reciben más radiación solar, resultaron ser las más susceptibles, relacionado a que los flujos de detritos se inician generalmente por el rápido derretimiento de la nieve.

Las alturas más susceptibles son las que van desde los 2.900 a los 4.400 m s. n. m., coincidente con el dominio de los procesos periglaciales, disminuyendo a elevaciones superiores donde existen procesos glaciales. Por último la categoría ausencia de vegetación resultó ser la más susceptible a la ocurrencia de flujos de detritos.

El modelo clasificó el 36% del área de estudio como de baja inestabilidad, el 13% del área como inestabilidad media y un 2% como inestabilidad alta. Las categorías de mayor estabilidad se encuentran representadas en el área de estudio en un 2% para estable, 15% para moderadamente estable y baja estabilidad en un 32%. La figura 3B (pág. 185) muestra el mapa de susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de resultado de la aplicación del índice Wi, y el histograma con los porcentajes de superficie para cada categoría de estabilidad.

Modelo con regresión logística

A partir de la aplicación de la regresión logística (tabla 2, pág. 186) se obtuvo la siguiente ecuación que explica la relación entre las variables consideradas que son significativas y la probabilidad de ocurrencia de flujos de detritos en el área de estudio:

$$Y = 2,43 - 0,00073 \text{ altura} + 0,05 \text{ pendiente} - 0,0026 \text{ orientación} - 1,67 \text{ Complejo Volcánico Aconcagua} - 1,8 \text{ depósitos aluviales} - 0,51 \text{ vegetación}$$

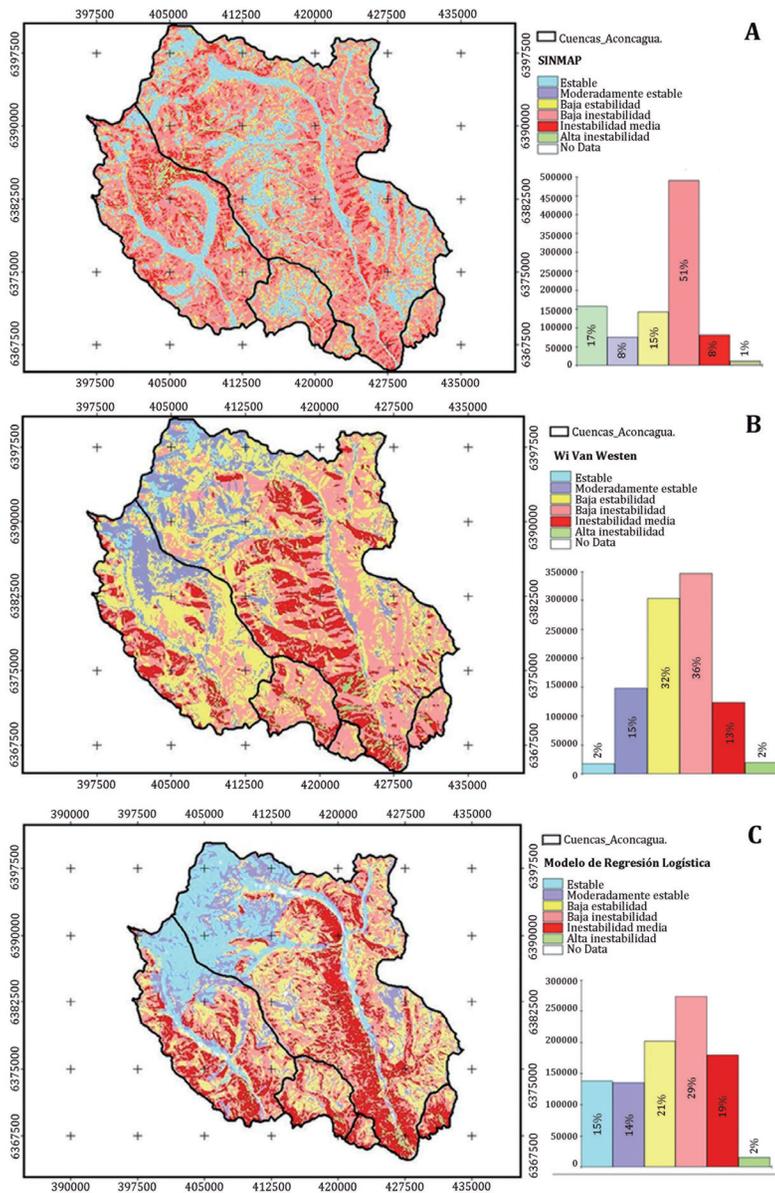


Figura 3. Mapas de susceptibilidad para el Parque Aconcagua obtenidos mediante la aplicación de los modelos: SINMAP (A), Wi (B) y Regresión logística (C) con los histogramas de los porcentajes de las áreas para cada categoría de estabilidad establecida por el modelo.

Figure 3. Susceptibility maps of the Aconcagua Park obtained by models SINMAP (A), Wi (B) and Logistic Regression(C) showing histograms with percentages of stability category areas classified by each model.

Tabla 2. Estimadores y su significación.**Table 2.** Estimators and their significance.

Parámetros	Estimador	Error estándar	Odd-ratio	Wald LI (95%)	Wald LS (95%)	Wald Chi ²	p-valor
Constante	2,43	0,54	11,34	3,94	32,64	20,28	<0,0001
Altura	-7,3E-04	1,3E-04	1,00	1,00	1,00	34,15	<0,0001
Pendiente	0,05	0,01	1,05	1,04	1,06	85,46	<0,0001
Orientación	-2,6E-03	5,7E-04	1,00	1,00	1,00	21,66	<0,0001
Complejo Volcánico Aconcagua	-1,67	0,20	0,19	0,13	0,28	71,07	<0,0001
Depósitos aluviales	-1,80	0,32	0,17	0,09	0,31	30,97	<0,0001
Vegetación	-0,51	0,18	0,60	0,43	0,85	8,37	0,0038

Los p-valores asociados a estos coeficientes son significativos, por lo tanto las variables pendiente, altura, orientación, vegetación, complejo volcánico Aconcagua y depósitos aluviales tendrán un efecto significativo a la hora de explicar la probabilidad de ocurrencia de flujos de detritos en la zona del Parque Provincial Aconcagua.

Los odd ratio asociados a las variables vegetación, litologías complejo volcánico Aconcagua y depósitos aluviales indican que la presencia de estas disminuye la probabilidad de ocurrencia de flujos de detritos.

El modelo clasificó el 29% del área como de baja inestabilidad, el 19% del área como inestabilidad media y un 2% como inestabilidad alta. Las categorías de

mayor estabilidad se encuentran representadas en el área de estudio en un 15% para estable, 14% para moderadamente estable y baja estabilidad en un 21%.

La figura 3C (pág. 185) muestra el mapa de susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de resultado de la aplicación del modelo de regresión logística, y el histograma con los porcentajes de superficie para cada categoría de estabilidad.

Validación espacial de los resultados

La capacidad de predeción espacial de los modelos utilizados para el área de estudio es buena ya que entre el 76% y 81% de los flujos de detritos coincidieron con zonas de mayor inestabilidad en el proceso de validación (tabla 3).

Tabla 3. Porcentaje de flujos de detritos clasificados en las distintas categorías de estabilidad.**Table 3.** Percentage of debris flows classified in the different stability categories.

Modelos	Clases de Susceptibilidad					
	Estable	Moderadamente estable	Baja estabilidad	Baja inestabilidad	Inestabilidad media	Alta inestabilidad
SINMAP		24%			76%	
Wi		20%			80%	
R. logística		19%			81%	

DISCUSIÓN

La valoración de la susceptibilidad obtenida mediante los modelos utilizados es satisfactoria ya que predice entre el 76% al 81% de los flujos de detritos históricos en las zonas categorizadas con la mayor inestabilidad. Sin embargo, se observan discrepancias entre los modelos. El modelo SINMAP genera mayoritariamente valores de alta inestabilidad en el sector noroeste del área, mientras los modelos estadísticos indican una zona de menor susceptibilidad.

En el modelo físico la presencia del Complejo Volcánico Aconcagua, elevaciones superiores a 4400 m s. n. m. y fuertes pendientes resaltan el grado de inestabilidad, a pesar que a estas alturas se producen procesos glaciares que no dan lugar a la saturación del terreno para generar flujos de detritos, por lo cual las predicciones de los modelos estadísticos son más realistas.

El SINMAP ha sido aplicado por varios autores para evaluar susceptibilidad (7, 14, 25, 26). Aunque los modelos de base física pueden ser adecuados para el modelado de las condiciones hidrológicas que lleva a la iniciación de los flujos de detritos, tienen varias limitaciones cuando se aplica para predecir la distribución espacial de los mismos (2).

Con excepción de la morfología de la pendiente, de hecho, las variables físicas que controlan la distribución espacial de la zona de iniciación de los flujos dentro de estos modelos (es decir, parámetros físicos y mecánicos de la pendiente y el material) no pueden ser adquiridas en grandes áreas a un costo razonable. En el área de estudio se desconocen varios parámetros y existe una gran heterogeneidad en cuanto a las litologías y propiedades del terreno, por lo tanto es difícil

conseguir la información para realizar las calibraciones del modelo. Se recomienda que el modelo SINMAP sea empleado en el área de estudio para analizar la inestabilidad en cuanto a parámetros topográficos únicamente (por ejemplo, pendiente, área de contribución), los cuales pueden ser obtenidos fácilmente a partir del DEM.

El análisis llevado a cabo a partir del W_i de Van Westen permite conocer las clases de cada variable más susceptible a ser afectada por flujos de detritos. Sin embargo, no determina la importancia relativa de cada variable en la valoración de la susceptibilidad.

La regresión logística basa el análisis en las variables que son significativas, excluyendo aquellas que no influyen significativamente en la probabilidad de ocurrencia de los eventos, proporcionando resultados más precisos. Es por ello, que la regresión logística resulta la más apropiada para la determinación de la susceptibilidad a flujos de detritos históricos por varios autores (1, 3, 9, 13, 19).

La literatura de los últimos 10 años muestra un claro aumento en el uso de análisis de regresión múltiple (1).

Asimismo, los análisis estadísticos muestran que varios factores ambientales contribuyen a la clasificación de las zonas con diferente susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos. Sin embargo, algunos de ellos ejercen mayor influencia, en este caso y según el análisis de regresión logística los factores que más afectan son: la pendiente, la orientación, la altura, la vegetación y las litologías "complejo volcánico Aconcagua" y "depósitos aluviales".

Los modelos W_i y logístico resaltan la gran susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos de la zona de ingreso

al Parque por la Quebrada del río Vacas. Los campamentos Pampa de Leñas y Casa de Piedra quedan clasificados en las categorías de mayor inestabilidad y el campamento Plaza Argentina coincide con zonas clasificadas en las categorías de mayor estabilidad a pesar que se encuentra afectada por grandes bloques de caídas de rocas (17, 18).

En la Quebrada del río Horcones, la zona de los Grises, aguas abajo del campamento Confluencia, queda clasificada en las categorías de mayor inestabilidad, coincidiendo con las observaciones de Moreiras (2008), quien la describe como una zona de conos aluviales muy activos donde se encauzan flujos de detritos con recurrencia anual.

Playa Ancha queda clasificada en las categorías de mayor estabilidad para generar flujos de detritos aunque dominada por procesos aluviales. La zona por donde se encuentra la senda hacia plaza Francia queda clasificada en las categorías de mayor inestabilidad.

Por último, la ubicación del campamento Horcones se encuentra en zonas de mayor inestabilidad, los alrededores de Confluencia y Plaza Francia quedan clasificados en las categorías de mayor inestabilidad.

Los flujos extraordinarios del sector de los Grises podrían represar el desagüe natural que existe entre el depósito de la morena y la ladera izquierda del valle produciendo anegamiento o inundación del campamento Confluencia (15).

Los campamentos Plaza de Mulas, Nido de Cóndores y Berlín se encuentran en zonas de menor inestabilidad según los resultados de la regresión logística. Estos resultados concuerdan con trabajos previos (15), donde se enfatiza que la localización actual del campamento de Plaza de Mulas es un sitio poco susceptible a ser afectado por flujos de detritos.

Con respecto a los campamentos a lo largo del valle del río de Las Vacas, Plaza Argentina queda clasificada en las categorías de mayor estabilidad, Casa de Piedra con mayor inestabilidad y por último los alrededores de Pampa de Leñas quedan clasificados en las categorías de mayor inestabilidad.

Los resultados hallados en este trabajo reflejan la susceptibilidad del terreno a generar flujos de detritos, pero no se contemplaron los sectores de trayectoria y depósitos de los flujos. Estos procesos suelen fluir pendiente abajo y converger en canales, cuando son originados en diferentes sectores de una cuenca, pueden combinarse en estos canales y aumentar su poder de destrucción.

Las áreas de mayor peligro se encuentran en las desembocaduras de gargantas, quebradas secas, abanicos aluviales e incluso ríos, ya que los flujos de detritos suelen encausarse en estos también (16). Es por esto que este trabajo debe complementarse con análisis de predicción de trayectorias de los eventos, ya que si bien suelen originarse en pendientes de 16 a 35°, luego de su iniciación, debido a la gran velocidad y al hecho de estar saturados de agua, pueden trasladarse hacia zonas de menor pendiente muy lejos de la zona de iniciación, y son capaces de erosionar los materiales a lo largo del recorrido e incrementar notablemente su volumen inicial. Por lo tanto, es fundamental realizar un análisis conjunto de los resultados aquí obtenidos con observaciones de campo y relatos de las características de eventos ocurridos en el pasado.

Debido a que los flujos de detritos no son los únicos procesos que representan un riesgo para la población, es necesario realizar estudios de susceptibilidad para todos los procesos de remoción en masa presentes en el área de estudio.

Con el fin de conocer la susceptibilidad total y realizar una zonificación regional en función de todas las amenazas presentes en el PPA.

CONCLUSIÓN

El área de estudio tiene características favorables para la ocurrencia de flujos de detritos debido a sus fuertes pendientes representando una gran peligrosidad en la región.

La zonificación obtenida en este estudio permitió realizar un reconocimiento preliminar de las áreas con diferentes grados de susceptibilidad a generar flujos de detritos. Los modelos aplicados contribuyen a la predicción de futuros escenarios para el diseño de sistemas de prevención, aunque no contemplan los sectores de canalización y

depositación del material una vez iniciado su movimiento.

El modelo SINMAP no es adecuado para analizar la susceptibilidad como única herramienta ya que no se dispone de información para realizar las calibraciones pertinentes para obtener resultados más fiables. Con respecto a la metodología Wi se puede decir que es útil para conocer las clases de las variables condicionantes más susceptibles a la ocurrencia de flujos. Sin embargo, el hecho de considerar en el análisis a factores que contribuyen en menor medida conlleva a una disminución de su rendimiento.

Por último la regresión logística se considera la metodología más apropiada por su facilidad de aplicación y poder de predicción. Se recomienda la utilización del mapa obtenido a través de este método para la planificación y el análisis relacionado con la gestión de riesgos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Akgun, A. 2012. A comparison of landslide susceptibility maps produced by logistic regression, multi-criteria decision, and likelihood ratio methods: a case study at İzmir, Turkey. *Landslides*. 9: 93-106.
2. Carrara, A.; Crosta, G.; Frattini, P. 2008. Comparing models of debris-flow susceptibility in the alpine environment. *Geomorphology*. 94: 353-378.
3. Chauhan, S.; Sharma, M.; Arora, M. K. 2010. Landslide susceptibility zonation of the Chamoli region, Garhwal Himalayas, using logistic regression model. *Landslides*. 7: 411-423.
4. Corominas, J. 1989. Clasificación y reconocimiento de los movimientos de ladera. En: Corominas, J. (Ed): Estabilidad de taludes y laderas naturales. Monografía N° 3 de la Sociedad Española de Geomorfología. 1-30. Barcelona.
5. Costa, J. E.; Fleisher, P. J. 1984. Physical geomorphology of debris flows. *Developments and applications of geomorphology*. 268-317.
6. Cruden, D. M.; Varnes, D. J. 1996. Landslide types and processes. In: Turner A. K.; Shuster R. L. (eds) *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transp Res Board. Spec Rep 247. 36-75.
7. Deb, S.; El-Kadi, A. 2009. Susceptibility assessment of shallow landslides on Oahu, Hawaii, under extreme-rainfall events. *Geomorphology*. 108: 219-233.
8. Di Rienzo, J. A.; Casanoves, F.; Balzarini, M. G.; Gonzalez, L.; Tablada, M.; Robledo, C. W. InfoStat versión 2012. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. Argentina. Disponible en: <http://www.infostat.com.ar>
9. Duman, T. Y.; Can, T.; Gokceoglu, C.; Nefeslioglu, H. A.; Sonmez, H. 2006. Application of logistic regression for landslide susceptibility zoning of Cekmece Area, Istanbul, Turkey. *Environ Geol*. 51: 241-256.

10. Esper Angillieri, M. Y. 2010. Peligros geológicos asociados a procesos de remoción en masa e inundaciones con características destructivas. Área de Amortiguación del Parque Nacional San Guillermo. Provincia de San Juan. Tesis Doctorado en Ciencias Geológicas. Universidad Nacional de San Juan. San Juan. Argentina.
11. Hutter, K.; Svendsen, B.; Rickenmann, D. 1996. Debris flow modeling: A review. *Continuum Mech. Thermodyn.* 8: 1-35.
12. Koeppen W. 1931. *Grundriss der Klimakunde*. Walter de Gruyter Co. 12. Berlin. 388 p.
13. Lee, S.; Pradhan, B. 2006. Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides* (2007) 4: 33-41.
14. López, E.; Riedel, P.; Bentz, C.; Ferreira, M. 2007. Calibración y validación del índice de estabilidad de pendientes con deslizamientos de tierras naturales en la cuenca del río da Onça en la región de la Serra de Cubatão, SP. *Goeciencias*. 26(1): 83-95.
15. López-Lima, D.; Carrión, G.; Sánchez-Nava, P.; Desgarenes, D.; Villain, L. (en prensa). Fungal diversity and *Fusarium oxysporum* pathogenicity associated with coffee corky-root disease in Mexico. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina*.
16. Moreiras, S. M. 2008. Inventario de procesos de remoción en masa: peligrosidad y riesgo asociado. Informe técnico preliminar Recursos Naturales de la Provincia de Mendoza.
17. Moreiras, S. M. 2009. Análisis estadístico probabilístico de las variables que condicionan la inestabilidad de las laderas en los valles de los ríos Las Cuevas y Mendoza. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. 65(4): 780-790.
18. Moreiras, S. M.; Lenzano, M. G.; Riveros, N. 2008. Inventario de procesos de remoción en masa en el Parque provincial Aconcagua, provincia de Mendoza - Argentina. *Multiequina. Latin American Journal of Natural Resources*. 17: 129-146.
19. Moreiras, S. M.; Lisboa, M. S.; Mastrantonio, L. 2012. The role of snow melting upon landslides in the central Argentinean Andes. *Earth Surface Processes and Landforms*. Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/esp.3239.
20. Nandi, A.; Shakoor, A. 2009. A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses. *Engineering Geology*. 110: 11-20.
21. Pack, R.T.; Tarboton, D. G.; Goodwin C. N. 2001 Assessing Terrain Stability in a GIS using SINMAP. Presented at the 15th annual GIS conference, GIS 2001. Vancouver, British Columbia.
22. Ramos, V. A. 1993. "Interpretación tectónica". XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Explotación de Hidrocarburos (Mendoza). *Geología y Recursos Naturales de Mendoza*. Victor Ramos (Ed.). Relatorio. 1:(19): 257-266.
23. Ramos, V. A. 1996. Evolución tectónica de la alta cordillera de San Juan y Mendoza. In *Geología de la región del Aconcagua, provincias de San Juan y Mendoza*, Ramos V (ed.). Subsecretaría de Minería de la Nación, Dirección Nacional del Servicio Geológico Anales: Buenos Aires. 24(1): 447-460.
24. Randis, A. 2012. Recursos geomorfológicos del Parque Provincial Aconcagua. Tesis de grado. Ingeniería en Recursos Naturales Renovables. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Inédito.
25. Recursos Naturales. 2009. *Records y Estadísticas, Parque Provincial Aconcagua 2009*. División Informática, Dirección de recursos naturales renovables. Secretaría de medio ambiente. Gobierno de Mendoza.
26. Redin Vestena, L. 2010. Mapeamento da susceptibilidade a deslizamentos na Bacia hidrográfica do caeté, Alfredo Wagner/sc. Programa de Pós-Graduação em Geografia, UNICENTRO. DOI: 10.4215/RM2010.0919.0013.
27. Salas, A.; Rusconi, J. M.; Camino, N.; Eliceche, D.; Achinelly, M. F. 2017. First record of *Diploscapter coronata* (Rhabditida), a possible health significance nematode associated with tomato crops in Argentina. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina*. 49(1): 167-173.
28. Terhorst, B.; Kreja, R. 2009. Slope stability modelling with SINMAP in a settlement area of the

Swabian Alb. Landslides. 6: 309-319.

29. Van Westen, C. J. 1997. Statistical landslide hazard analysis ILWIS 2.1 for Windows application guide. ITC Publication. Enschede. 73-84.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia, Técnica y Posgrado de la Universidad Nacional de Cuyo por la financiación del Proyecto 06/A513.