

Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Ciencias Agrarias.

Ingeniería en Recursos Naturales Renovables.

Mendoza, Argentina.



TESIS DE GRADO

**Evaluación de la susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de
detritos a escala regional en el Parque Provincial Aconcagua,
Mendoza, Argentina.**



Autora: María Alisa Alvarez

Director: Leandro Mastrantonio

Codirector: Stella Maris Moreiras

2013

Agradecimientos

A mi director **Leandro** por sus valiosas enseñanzas, su paciencia, su amistad, su aliento y confianza, por todo el tiempo dedicado en la realización de este trabajo y por su apoyo incondicional durante toda la carrera.

A mi co-directora **Stella** por su confianza, sus valiosos aportes y enseñanzas, y por brindar información básica para la realización de este trabajo.

Al jurado evaluador **María Laura Gomez, Luis Rodriguez Plaza** y **Carlos Rubén Bajeta**, por sus valiosos aportes para enriquecer este trabajo.

A **Ramón Olivera**, por su ayuda y acompañamiento durante la campaña de campo.

A mi mamá, **Liliana** y mis hermanos, **Lau, Flor** y **Edu** por ser el sostén de mi vida, mi contención, mis guías y consejeros, por sus fuerzas y amor incondicional, por empujarme a seguir adelante siempre, por apoyarme en todas las decisiones y ayudarme en mis indecisiones! Sin ustedes nada hubiese sido posible.

A mi nona **María** por sus rezos antes de rendir un examen y por haber sido mi compañía de estudio muchas veces.

A mis amigos **Sol, Rosi, Noel, Celi, Agus, Pau, Vero, Flor, Vani, Bruno, Fer, Mati**, por apoyarme y acompañarme en todos los momentos y hacer mas divertida la carrera y la vida!

A todas las personas que trabajan día a día para mejorar la carrera y hacen posible la formación de nuevos profesionales.

A la Universidad Nacional de Cuyo por darme tantas oportunidades para seguir estudiando y formándome, y por brindarme una educación de tan alta calidad.

INDICE

Resumen	5
1. Introducción.....	6
2. Fundamentos e hipótesis	8
3. Objetivos generales y específicos	9
4. Marco teórico	9
4.1. Proceso de remoción en masa.....	9
4.2. Factores de control.....	10
4.2.1. Factores condicionantes	10
4.2.2 Factores desencadenantes	12
4.3 Flujos de detritos	14
4.4. Conceptos de Peligrosidad, Susceptibilidad y Riesgo.....	18
4.4.1. Riesgo	18
4.4.2. Gestión de riesgos	19
4.4.3. Vulnerabilidad	19
4.4.4. Peligrosidad	19
4.4.5 Susceptibilidad	19
4.4.5.1. Evaluación de la susceptibilidad.....	19
4.4.5.2. Mapas de susceptibilidad	20
4.4.5.3. Métodos para estimación de susceptibilidad	21
4.4.5.3.1. Métodos Estocásticos	21
4.4.5.3.2. Métodos deterministas. Modelos de base física.....	25
5. Descripción del área de estudio	29
5.1. Localización	29
5.2. Vías de acceso.....	29
5.3. Creación del Parque Provincial Aconcagua	29
5.4. Interés geológico.....	30
5.5. Elementos bióticos	30
5.5.1. Vegetación	30
5.5.2. Fauna.....	32
5.6. Organización del Parque Provincial Aconcagua y vías de ascenso	33
5.7. Actividades que se desarrollan en la Zona.....	35
5.8. Población dentro del Parque Provincial Aconcagua.....	35
5.9. Clima	35
5.10. Hidrología.....	38
5.11. Geología Regional.....	39
5.12. Recursos geomorfológicos.....	40
5.13. Sismicidad.....	41
5.14. Topografía.....	42
5.15. Suelos	45
6. Metodología	46

6.1. Análisis de imágenes satelitales	46
6.2. Descripción del área de estudio y revisión bibliográfica	46
6.3. Campañas de campo	47
6.4. Análisis de muestras en el laboratorio.....	48
6.5. Mapa inventario de flujos de detritos.....	48
6.6. Modelo Digital de Elevaciones (MDE)	49
6.7. Programas empleados para el análisis	49
6.8. Análisis descriptivo.....	49
6.9. Análisis de susceptibilidad	50
6.9.1. Modelos estadísticos.....	50
6.9.1.1. Statistical index (Wi) method de Van Westen (1997)	51
6.9.1.1.1. Evaluación de factores: normalización	51
6.9.1.1.2. Cálculo del índice de susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos a partir del Wi de Van Westen	53
6.9.1.2. Análisis multivariado: Regresión Logística	53
6.9.2. Ajuste del modelo de base física SINMAP	53
6.10. Validación de los resultados.....	54
6.11 Medidas preventivas	54
7. Resultados y discusión.....	55
7.1. Salida a campo	55
7.2. Análisis de muestras en el Laboratorio	61
7.4. Análisis estadístico descriptivo.....	67
7.4.1. Análisis descriptivo por cuenca	67
7.4.2. Medidas descriptivas de tendencia y posición central para los flujos de detritos	69
7.5. Análisis de Susceptibilidad.....	70
7.5.1. Statistical index (Wi) method de Van Westen (1997)	70
A) Análisis descriptivo, evaluación de factores: normalización	70
B) Cálculo del índice de susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos a partir del Wi (Van Westen, 1997)	76
7.5.2. Análisis multivariado: regresión logística.....	78
7.5.3. Ajuste del Modelo SINMAP	81
7.5.4. Comparación de los distintos modelos y validaciones	85
8. Conclusiones y contribuciones al Parque Provincial Aconcagua	89
9. Bibliografía	92
ANEXOS	99

Resumen

Los flujos de detritos son peligros geológicos comunes que amenazan a la comunidad y a la actividad turística en el Parque Aconcagua. La principal causa de estos eventos en el área es la saturación de los materiales de las laderas durante el deshielo en la época estival. Se generan en pendientes abruptas alcanzando grandes velocidades y pueden desplazarse en pendientes más suaves. En ocasiones han arrastrado animales y provocado la obstrucción de cauces. Este estudio tiene como objeto evaluar la susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos en la región del Parque Provincial Aconcagua y, de esta manera, generar una zonificación del área en función del grado de susceptibilidad a dichos procesos naturales.

La probabilidad de ocurrencia de flujos de detritos varía espacialmente dependiendo de factores condicionantes como son la litología, la pendiente, la altura, la orientación y la presencia de vegetación. Éstos son comparados mediante la superposición espacial de capas temáticas a través de un SIG con un mapa inventario de flujos de detritos. Se aplicó el método de base física SINMAP y los métodos estadísticos de regresión logística y statistical index (Wi) method de Van Westen (1997) para la predicción de la susceptibilidad. De esta forma se obtuvieron como resultado tres mapas de susceptibilidad obtenidos por modelos distintos. Los resultados fueron validados mediante una superposición espacial del mapa de susceptibilidad con un mapa inventario constituido por los eventos que no han sido utilizados en el proceso de ejecución de los modelos.

Se observó que los tres modelos tuvieron un buen desempeño. Sin embargo, al comparar visualmente el mapa obtenido a través de SINMAP con los obtenidos a partir de los modelos estadísticos, se observa que en la zona noroeste del área, SINMAP genera mayoritariamente valores de alta inestabilidad cuando, según los otros dos modelos son zonas de menor susceptibilidad. No se recomienda aplicar SINMAP en el área de estudio como modelo para estimar susceptibilidad ya que, al no ser factible la calibración de los parámetros del modelo se está haciendo el análisis únicamente en función de las pendientes. Los resultados de la regresión logística muestran que los factores ambientales que ejercen mayor influencia en la susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos en orden decreciente son: la pendiente, la orientación, la altura, la vegetación y por último, las litologías "Complejos Volcánico Aconcagua" y "Depósitos aluviales".

PALABRAS CLAVES: flujos de detritos, susceptibilidad, factores condicionantes, modelos de predicción.

1. Introducción

El Parque Provincial Aconcagua forma parte del Sistema de áreas Protegidas de la Provincia de Mendoza, Argentina (Ley 4807/83), se crea con el objeto de conservar la flora y la fauna alto andina y el material arqueológico allí existente. Es un sitio de gran interés para los andinistas, el turismo aventura, y los científicos. Se encuentra ubicado en la cordillera principal de la cadena montañosa de Los Andes. Cuenta con cumbres que superan los 5.000 msnm., hasta alcanzar su máxima expresión en la cumbre Norte del Cerro Aconcagua. Ésta constituye la montaña más alta del Hemisferio Occidental, la última medición realizada por miembros del Programa Sistema de Investigación Geodinámico Monte Aconcagua (SIGMA) y del Instituto Geográfico Nacional (IGN), arrojó una altura de 6.960,8 msnm.

En el Parque Provincial Aconcagua 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 (Moreiras, 2008). Los flujos de detritos, junto con las avalanchas de nieve y caídas de rocas son uno de los peligros geológicos más comunes que amenazan a la comunidad y a la actividad turística en la zona.

Un flujo de detritos es un movimiento en masa, inducido por la gravedad (Costa *et al.*, 1984), que incluye varios tamaños de sedimentos, agua y aire, y frecuentemente iniciados por precipitaciones y/o procesos de remoción en masa (Hutter *et al.*, 1996). En general, estos procesos se caracterizan por un desplazamiento rápido y corresponden a una masa desorganizada de rocas, detritos, materia orgánica y lodo pendiente abajo y con abundante cantidad de agua, lo que le otorga la forma de un líquido viscoso, capaz de transportar cualquier objeto que se encuentre en su camino (Cruden y Varnes, 1996).

Los flujos de detritos se originan en zonas de pendientes abruptas por la adición de agua debida a precipitaciones intensas o al rápido derretimiento de nieve, pero una vez generado, puede movilizarse en pendientes muy suaves. Dependiendo de la viscosidad del flujo será la distancia que recorra. Generalmente en climas áridos se canalizan en hondonadas del terreno dando lugar a morfologías diferentes (Corominas, 1989). Suelen generar albardones durante su recorrido depositándose en la parte inferior de las laderas dando lugar a abanicos aluviales.

El gran poder transportador como su característica prácticamente instantánea debido a las grandes velocidades que desarrollan (55 km/h), hace a los flujos de detritos particularmente peligrosos, representando amenazas que podrían ocasionar serios daños a las personas, campamentos y otras infraestructuras. A su vez, estos eventos pueden desencadenar otros procesos peligrosos como endicamientos de cursos del río debido al material que transportan. Estos diques pueden colapsar y producir serios daños aguas abajo, como inundaciones, afectar infraestructura y ocasionar muerte o daños a las personas que se encuentren en la zona.

Los flujos de detritos representan un peligro inminente en el área analizada, es por ello la importancia de los modelos de predicción de tales procesos y de la cuantificación de las variables que los controlan a nivel local, ya que el comportamiento de estos flujos es muy variable dependiendo de su génesis.

Los procesos naturales rara vez pueden ser modificados en cuanto a sus magnitudes o frecuencias, pero se pueden limitar las pérdidas de vidas y destrucciones que ellos causan (Moreiras, 2008). 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. El paso inicial para esto, es la evaluación de la susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos, es decir, la probabilidad espacial de que ocurran flujos de detritos, sin analizar el factor temporal. El análisis se materializa normalmente en forma de mapas de susceptibilidad, los cuales muestran qué áreas poseen mayor o menor probabilidad de ocurrencia espacial de flujos de detritos, pero no informan sobre la probabilidad de ocurrencia en el tiempo. Los mapas resultantes son una herramienta básica para la planificación del territorio. Según Scheidl (2009) la valoración de peligrosidad de flujos de detritos implica no sólo la identificación espacial sino también la estimación de su magnitud y frecuencia, es decir, su probabilidad de ocurrencia. Esta probabilidad puede ser descripta bajo varios conceptos: de los principales mecanismos disparadores (relacionados al clima), de la ocurrencia de un evento en un espacio dado, y de la probabilidad condicionada que un evento ocurra dadas determinadas condiciones.

En el presente trabajo se busca realizar un análisis regional (escala 1:250.000) de la susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos en el área del Parque Provincial Aconcagua a través de la aplicación de Sistemas de Información Geográfica y de la utilización de modelos estadísticos y de base física. Para lo cual es necesaria una base de datos espaciales incluyendo los principales factores condicionantes de los flujos de detritos y el mapa inventario de los eventos. Con ello, se pretende generar información de base que brinde una herramienta de planificación y elaboración de estrategias para contribuir a evitar la ocurrencia de desastres, es decir, la materialización de las condiciones de riesgos existentes en el área.

2. Fundamentos e hipótesis

Los Andes poseen una gran diversidad en cuanto a sus rasgos litoestratigráficos, pedológicos y climáticos, que hacen de esta supra unidad morfoestructural un ambiente propicio para la ocurrencia de procesos morfodinámicos, que muchas veces, impactan negativamente a las comunidades (Gómez *et al.*, 2003).

En el Parque Aconcagua los flujos de detritos son procesos abundantes de gran recurrencia. El área es susceptible a ser afectada por procesos de remoción en masa debido a sus fuertes pendientes, laderas erosionadas por el hielo durante las antiguas glaciaciones, la presencia de gran cantidad de detritos generados por crioclastismo, de litologías favorables a colapsar y de marcadas debilidades estructurales debido a la orogenia Andina (Moreiras, 2008).

Los flujos de detritos son muy activos y violentos, en ocasiones han arrasado con animales en su trayectoria y generado la obstrucción total o parcial de los cauces, representando un riesgo para la población permanente y transitoria del Parque Aconcagua, como también para la infraestructura presente en el área. 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 (Moreiras, 2008).

Estos eventos parecen haber aumentado en incidencia en los últimos años, posiblemente por el retroceso de los glaciares y las zonas de permafrost en las elevaciones más altas debido al cambio climático global (Hutter *et al.*, 1996). Las predicciones climáticas globales estiman que los fenómenos climáticos serán más extremos produciéndose precipitaciones intensas, grandes volúmenes de agua caerán en cortos períodos de tiempo, lo cual podría generar un incremento de los movimientos gravitacionales en la Cordillera Principal-Frontal. Por otra parte, el calentamiento global desencadena temperaturas más elevadas que incrementan la cantidad de precipitaciones caídas en forma de lluvias en relación a la precipitación sólida (nieve), lo cual favorece la saturación del terreno y la generación de movimientos de laderas. Posiblemente, el mayor número de eventos registrados durante las últimas tres décadas en la región esté vinculado a este hecho (Moreiras, 2006; Moreiras *et al.*, 2008; Lisboa, 2011; Moreiras 2012 *et al.*, 2012).

La probabilidad de ocurrencia de flujos de detritos varía espacialmente dependiendo de factores condicionantes como la litología, la pendiente, la altura, la orientación y la presencia de vegetación.

En la zona de la reserva no existen trabajos antecedentes que analicen la susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos. Identificar, cuantificar y determinar la contribución relativa de los principales factores que condicionan a la ocurrencia de flujos de detritos, permite generar y aplicar modelos estadísticos y de base física, para obtener una zonificación espacial del Parque Aconcagua en función de la susceptibilidad a la ocurrencia de dichos eventos. Los mapas generados se utilizan como instrumentos en la toma de decisiones para los procesos de

planificación del uso del terreno, explotación de recursos naturales y el desarrollo de infraestructura y líneas vitales. Constituyen una herramienta que permite pronosticar futuros escenarios a fin de disminuir el riesgo asociado a estos procesos.

3. Objetivos generales y específicos

Evaluar la susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos en la región del Parque Provincial Aconcagua, mediante la aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y modelos estadísticos y de base física. De esta manera, generar una zonificación del área en función del grado de susceptibilidad a dichos procesos naturales, lo que constituye una herramienta de toma de decisiones para el Plan de Manejo de la Reserva.

Los objetivos específicos consisten en:

- Determinar el grado de control de las distintas variables geológicas en la ocurrencia de flujos de detritos (litología, pendiente, altura, orientación, vegetación)
- Evaluar distintos modelos (estadísticos y de base física) de predicción de flujos de detritos, a escala regional.
- Elaborar una zonificación regional de susceptibilidad por flujos de detritos, entendiéndose como zonificación de la susceptibilidad la determinación de áreas con diferentes grados de potencialidad para la ocurrencia de dichos eventos.
- Evaluar la calidad de la predicción del mapa de susceptibilidad mediante una validación espacial.
- Analizar la susceptibilidad de las zonas de ubicación actual de los campamentos.

4. Marco teórico

4.1. Proceso de remoción en masa

El término proceso de remoción en masa es utilizado como equivalente a landslide en inglés; denota el movimiento hacia abajo y afuera, de los materiales formadores de una ladera, compuesta por rocas, detritos, suelo o combinaciones de esos materiales ([Varnes, 1958](#) citado en [Lisboa, 2011](#)). En función de los movimientos involucrados se diferencian en: caídas, flujos de detritos y deslizamientos rotacionales o planares ([Varnes, 1978, 1984](#)). A su vez, existen procesos más complejos donde se combinan más de un tipo de movimiento como por ejemplo las avalanchas de rocas. Estos procesos comienzan como una caída de material o un deslizamiento finalizando en un flujo de detrito violento ([Randis, 2012](#)).

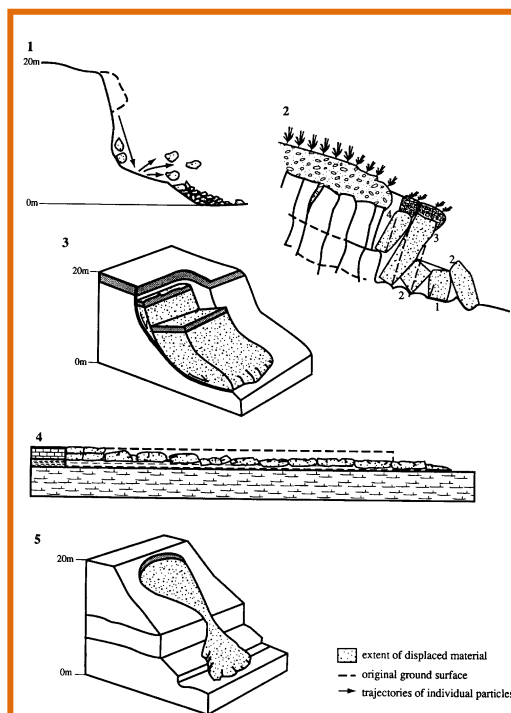


Figura 1: Tipos de procesos de remoción en masa. 1: Caídas; 2: Vuelcos; 3: Deslizamiento rotacional; 4: Expansión lateral de suelos y 5: Flujo de detritos. Fuente: Gutiérrez Elorsa, 2008.

4.2. Factores de control

Existen múltiples factores de control internos y externos que conducen a la inestabilidad de las laderas y a la susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos en masa, que claramente se producen en áreas con pendientes específicas bajo ciertas combinaciones de factores (Brunsden *et al.*, 1995 citado en Terhorst *et al.*, 2009). Estos son factores condicionantes y desencadenantes de los procesos de remoción en masa.

4.2.1. Factores condicionantes

Como factores condicionantes se entienden a los factores que determinan la susceptibilidad a la inestabilidad de las laderas, entre los cuales se destacan la litología, las estructuras geológicas, las condiciones hidrológicas y la historia geomorfológica del lugar. Los factores condicionantes son aquellos que reflejan las características del terreno e influyen en la distribución de PRM (Palmquist y Bible, 1980; Varnes, 1984; Crozier, 1986; Hutchinson, 1988 citados en Esper Angillieri, 2010). Para Ferrer Gijón (1995), están relacionados a la propia naturaleza, composición, estructura y forma de terreno (citado en Esper Angillieri, 2010). Estas variables contribuyen a la susceptibilidad de las vertientes y definen la distribución espacial de los movimientos en masa (Aristizábal *et al.*, 2010). Son considerados factores pasivos o intrínsecos, es decir que hacen a una vertiente susceptible al colapso pero sin provocar el inicio del movimiento, creando sin embargo, las condiciones para que el terreno llegue a un estado

de estabilidad marginal. Estos factores pueden cambiar en una amplia escala de tiempo. La distribución espacial de las propiedades intrínsecas dentro de un área determinada facilita la determinación de la distribución espacial de la susceptibilidad relativa de esa área a ser afectada por movimientos en masa (Gómez, 2003).

Entre los factores condicionantes que afectan la estabilidad de las laderas, podemos mencionar como más importantes, los siguientes:

Litología

La litología es una de las variables más importantes a ser considerado en el análisis de la distribución de los procesos de remoción en masa. La información geológica ha sido utilizada por numerosos autores en la valoración de la susceptibilidad-peligrosidad de los procesos de remoción en masa (Brabb *et al.*, 1972; Nilsen *et al.*, 1979; Drennon y Scheiling, 1975; Bosi, 1978; Espizúa *et al.*, 1993 citados en Moreiras, 2004b). El tipo de inestabilidad de un talud está íntimamente relacionado con las diferentes litologías presentes. Las propiedades físicas y la resistencia de cada material determinan su comportamiento tenso-deformacional y, por lo tanto, su estabilidad. En los macizos rocosos las inestabilidades suelen generarse por la existencia de capas o estratos de diferente competencia (Moreiras, 2004b). Los tipos de suelos y rocas juegan un papel preponderante en el comportamiento dinámico de las laderas (Mora *et al.*, 1992 citado en Mora, 2004). La composición mineralógica, la capacidad de retención de humedad, los espesores y grado de meteorización, el estado de fracturamiento, el ángulo de buzamiento, la posición y variación de los niveles freáticos, etc., influyen claramente en la estabilidad o inestabilidad de las laderas (Mora *et al.*, 1992 citado en Mora, 2004).

Pendiente

El grado de pendiente es un valioso factor contribuyente a la ocurrencia de procesos de remoción en masa, la mayoría de las valoraciones de peligrosidad y susceptibilidad de los procesos de remoción en masa a escala regional utilizan la pendiente como uno de las variables independientes más importantes (Brabb *et al.*, 1972; Campbell y Bernknopf, 1993 citados en Moreiras, 2004b). Es fundamental el análisis de esta variable, ya que la pendiente influye, junto a otros factores, en el potencial de inestabilidad de las laderas de una manera directamente proporcional (Moreiras, 2004b).

Altura

Las precipitaciones varían con respecto a las alturas por lo cual la influencia de las precipitaciones en la iniciación de PRM depende de la topografía (Záruba y Mencl, 1982). Es por esto que el relieve es un parámetro importante en el análisis de la inestabilidad de las pendientes (Moreiras, 2008b).

Geomorfología

La historia geomorfológica de un determinado lugar en forma conjunta con los procesos geomorfológicos actuantes en el presente se relacionan a la inestabilidad de las laderas. Las principales características geomorfológicas para ser consideradas en los mapas de zonificación de peligrosidad – riesgo de los procesos gravitacionales son los eventos ocurridos en el pasado. Sin embargo muchos procesos y geoformas suelen estar vinculadas al origen de los procesos de remoción en masa o zona de acumulación de sus depósitos ([Moreiras 2004b](#)).

Condiciones hidrológicas

La presencia de agua produce la reducción de la resistencia al corte de los planos de rotura al disminuir la tensión normal efectiva. La inestabilidad de las laderas aumenta, además, por diversos procesos como la presión ejercida sobre grietas de tracción, apertura de discontinuidades por el agua congelada (hielo), saturación, erosión interna por flujo sub-superficial o subterráneo, meteorización y cambios en la composición mineralógica de los materiales ([Sowers y Royster, 1978](#)).

En la región, la acción del flujo subterráneo es difícil de evaluar debido a que no existen estudios hidrogeológicos en las áreas montañosas.

El principal aporte de agua en el área de estudio corresponde a las precipitaciones níveas en la época invernal y en forma de lluvia en la época estival. Las lluvias intensas son las principales causas de desestabilización de las laderas que saturan a los materiales que las componen y aumentan su peso; por otra parte, la acción de la nieve asociada al proceso de crioclastismo es importante en los sectores más altos ([Moreiras, 2004b](#)).

4.2.2 Factores desencadenantes

Los procesos de remoción en masa pueden ponerse en movimiento por diversos cambios internos o externos en las condiciones de estabilidad. A los factores causantes de estos cambios se los conoce como factores desencadenantes, dentro de los cuales destacan los sismos (responsables principalmente de caídas, deslizamientos y avalanchas de rocas), y las lluvias intensas (que generan en su mayoría flujos y deslizamientos). Aunque ambos factores son capaces de desencadenar todos los tipos de remociones en masa, la saturación del suelo como consecuencia del deshielo rápido de la cubierta de nieve, es también conocida como factor que acciona el mecanismo de caída y flujos ([Moreiras, 2004b](#) [Lisboa, 2011](#); [Moreiras et al., 2012](#)).

Precipitaciones

Las precipitaciones son uno de los factores causales principales que influyen en la frecuencia de los procesos de remoción en masa. Esta influencia dependerá de las condiciones climáticas, la topografía del área, estructuras geológicas, la permeabilidad y propiedades de los materiales ([Záruba y Mencl, 1982](#)). Otros factores juegan además un rol importante en la iniciación de los

eventos, tal como el grado de diaclasamiento, cantidad de material detrítico inestable, grado de inestabilidad, saturación del material previa a la tormenta, duración de la precipitación, etc. (Moreiras, 2004 b). Precipitaciones excesivas debilitan los materiales ya que al infiltrar, el agua desplaza el aire de los poros y fracturas incrementando la presión intersticial, de esta manera disminuye la resistencia de los materiales.

Para que ocurra un proceso de remoción en masa, la saturación por infiltración debe ser más rápida que la capacidad de drenaje interna de los materiales, de tal forma que se genere un aumento rápido de la presión interna y un flujo de agua subterránea paralelo a la superficie del talud (Esper Angillieri, 2010).

La precipitación es considerado el estímulo externo que puede generar una respuesta casi inmediata de movilizar los materiales que conforman la vertiente, sea por el rápido incremento de los esfuerzos o por la reducción de la resistencia (Aristizábal, 2010). Según Moreiras (2005) la ocurrencia de flujos de detritos y deslizamientos está relacionada con un valor de precipitación diaria de entre 6,5 y 12,9 mm. Por otro lado Bandhari *et al* (1991) estableció que los flujos de detritos y los deslizamientos superficiales pueden ser activados por una precipitación diaria y antecedente de entre el 8 y 17% de la precipitación media anual de la zona (citado en Lisboa, 2011).

Sismos

Este factor es desencadenante de procesos de remoción en masa. En la zona de estudio, los flujos de detritos, como se menciona en el trabajo de Moreiras (2008), rara vez han sido reportados asociados a sismos.

Actividades antrópicas

Los procesos de remoción en masa se encuentran afectados por la actividad antrópica que no sólo puede originarlos, debilitando la roca o construyendo taludes inestables; sino además, afectando las medidas de mitigación propias del ecosistema. El rol de las modificaciones realizadas por el hombre incluye los cambios en las magnitudes, frecuencia y tipo de procesos geomorfológicos (Lisboa, 2011). En el área de estudio no existen datos históricos significativos previos a las principales modificaciones realizadas por el hombre en el medio como la construcción de la ruta internacional a Chile, del ferrocarril Transandino y la creación del Parque provincial Aconcagua (1983) con un ingreso anual promedio de 7000 visitantes. Por tal motivo, no se puede realizar un preciso análisis para atribuir un incremento de los registros históricos en los últimos años a la acción antrópica exclusivamente. La instalación de infraestructuras modifica la permeabilidad de los materiales, lo cual afecta la capacidad de infiltración de las aguas meteóricas e incrementa el escurrimiento superficial; en consecuencia, se facilita la generación de flujos de detritos (Moreiras, 2004b).

4.3 Flujos de detritos

Los flujos son fluidos saturados no newtonianos que contienen una concentración mayor de 40% en peso de sedimentos. Si estos flujos están integrados en un 20% a 80% por partículas cuyo diámetro es mayor a 2 mm (arena fina) se denominan flujos de detritos; mientras si el 80% del material que lo constituye tiene un tamaño inferior se conoce como flujo de barro (mud flow) o flujo de tierra (earth flow) (Cruden y Varnes, 1996).

Los flujos de detritos son movimientos rápidos que ocurren generalmente en diferentes ambientes. Se asocian principalmente a suelos saturados de agua durante lluvias intensas de corta duración o deshielos en épocas estivales. Su consistencia puede ser de lodo acuoso a lodo espeso y rocoso (como cemento húmedo), lo suficientemente denso como para arrastrar piedras grandes, árboles y automóviles. Alcanzan velocidades de hasta 55 km/hra (15 metros por segundo o más)

No todas las partículas se desplazan a la misma velocidad ni sus trayectorias son paralelas y debido a ello la masa movida no conserva su forma en su movimiento descendente, adoptando a menudo morfologías lobuladas. La corriente puede bajar tanto por laderas abiertas como canalizada por vaguadas u hondonadas del terreno dando lugar a morfologías diferentes (MAPGAP, 2007). El movimiento del fluido se puede relacionar generalmente con flujo turbulento de granos. Son generalmente flujos turbulentos de dos fases. La fase líquida consistente en agua y partículas finas y la fase propiamente sólida, son las partículas gruesas (Suárez, 2009).

Estos fluidos son comunes en los ríos, en el terreno al pie de cañadones y las desembocaduras de abanicos aluviales que son particularmente peligrosas. Las áreas excavadas para la construcción de carreteras son también propicias así como las áreas donde se canaliza la escorrentía del agua superficial, como a lo largo de las carreteras y bajo las alcantarillas.

Los flujos de detritos son los procesos principales que conforman los sistemas de cursos intermitentes o temporarios que se asocian a los ambientes aluviales. Al salir del frente montañoso donde se encuentran encauzados inundan las superficies pedemontanas en distintas direcciones generando los conos o abanicos aluviales (Figura 2). Estas geoformas se diferencian principalmente en que los abanicos presentan pendientes inferiores a los 15° mientras que los conos presentan pendientes superiores. Los depósitos de los abanicos aluviales corresponden a distintos niveles o episodios de flujos de detritos cuyos depósitos se caracterizan por una mala selección. Pueden ser clastos soportados o contener un alto porcentaje de matriz. Los bloques o detritos son angulosos y por lo general presenta una selección inversa grano-creciente. Esto se debe a que los bloques mayores suelen flotar en la masa detrítica o fangosa más viscosa (Randis, 2012). En general los flujos de detritos se caracterizan por depósitos matriz sostén y mal seleccionados, los clastos se presentan orientados paralelamente respecto el eje mayor y la dirección del flujo (Polanski, 1972).

Los flujos de detritos se movilizan pendiente abajo encauzados en canales fluviales pero logran detenerse en pendientes de 10° a 20° (Li *et al.*, 1983).

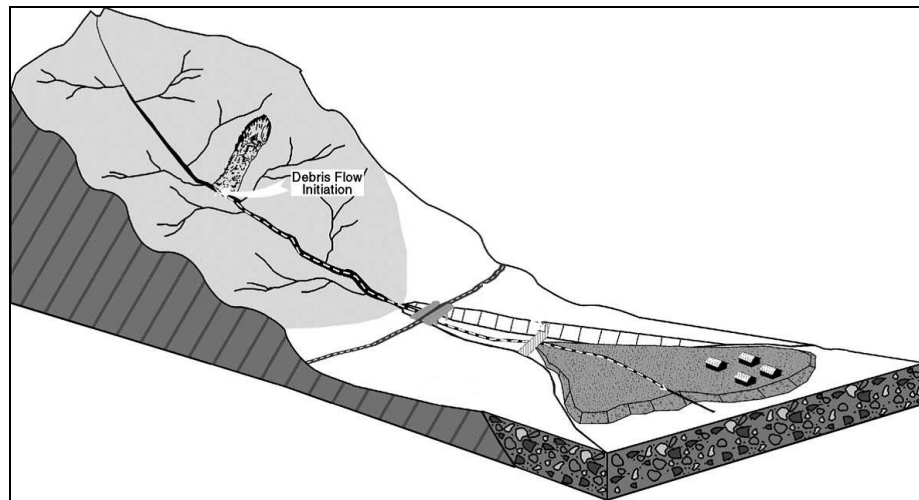


Figura 2: Esquema conceptual de un flujo de detritos. Fuente: Jakob (2005).

4.3.1. Flujos de detritos en el Parque Provincial Aconcagua

En el Parque Provincial Aconcagua se han identificado un total de 923 flujos en base a sus geoformas (Figura 3). En promedio la longitud de los eventos identificados por Randis (2012) tiene alcances de 737,6 m. En el inventario realizado por Moreiras (2008) se determinó que los flujos con longitud superior a 500 m. tenían un área media de 0,40 km².

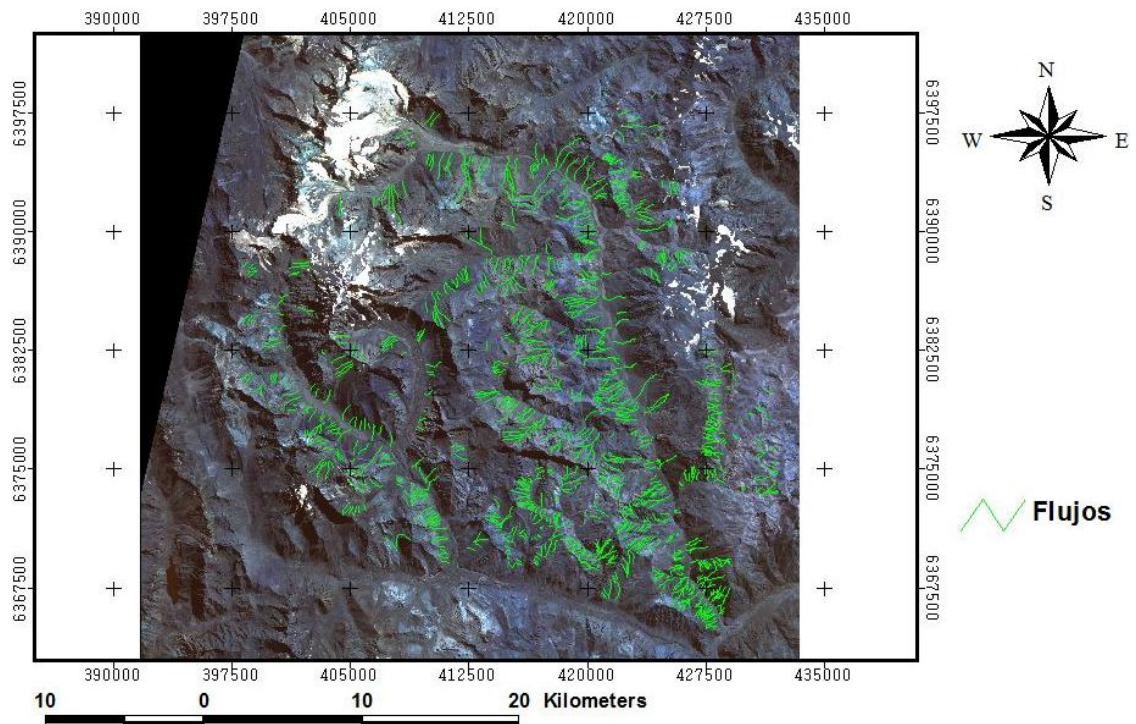


Figura 3: Inventario de flujos de detritos. Fuente: Randis (2012).

En el inventario de procesos de remoción en masa para el PPA realizado por [Moreiras \(2008\)](#) se encontró que en el valle de Horcones la mayoría de los procesos identificados corresponden a flujos de detritos o zonas de flujos principalmente asociados a conos aluviales. También los canales de estos flujos alimentan los glaciares de escombros en su zona de aporte a partir de los 3.200 msnm, o bien, los flujos de detritos se generan en la parte frontal de estos cuerpos de hielo por fusión parcial en los períodos de temperaturas más altas. En el valle del río de Las Vacas se reconocen numerosos flujos de detritos activos comúnmente encauzados en conos aluviales de importantes dimensiones. Algunos de estos eventos extraordinarios han represado el río de Las Vacas en varias ocasiones.

Encuestas realizadas a baqueanos señalan la ocurrencia de violentos flujos de detritos a lo largo de la ruta normal (valle del río Horcones), pero falta información en cuanto a la fecha de ocurrencia o la causa inicial del fenómeno. Estos eventos han arrasado con animales en su trayectoria y generado la obstrucción total o parcial de los cauces.

En el valle de Horcones, múltiples flujos de detritos se han encauzado en la quebrada del Durazno, evidenciados por sucesivos depósitos grano-crecientes y relatos históricos. [Espizúa \(1993\)](#) describió un flujo de barro proveniente de esta quebrada en el año 1985. Aguas arriba de la quebrada del Durazno, en el paraje Los Blancos (o “Los Grises”), se observan conos aluviales muy activos donde se encauzan flujos de detritos con recurrencia anual. Un evento reciente en la temporada 2009 ocasionó daños a mulares de prestadores del Parque ([Moreiras, 2009](#))

Aguas arriba del campamento Confluencia, se desarrollan ambientes de conos aluviales cuyos flujos de detritos han obstruido parcialmente el río Horcones generando grandes vegas. En esta misma zona reiterados flujos de detritos de carácter violento, provenientes de la ladera sur del cerro Promontorio, han dañado históricamente las superficies de las vegas. Flujos de detritos similares se generan en la parte frontal del glaciar de escombros de la quebrada del Sargento Más ([Moreiras et al., 2008](#)).

La actividad de los flujos de detritos disminuye en el sector de Playa Ancha donde existe un claro predominio de las geoformas criogénicas periglaciales. A partir de la piedra de Ibáñez, justamente instalada en el extremo de un glaciar de escombros, comienzan nuevamente los abanicos aluviales asociados a flujos de detritos hasta la Cuesta Brava. El grado de actividad y la violencia de estos flujos aumentan en dicha dirección.

El antiguo campamento de Colombia, aguas debajo de la cuesta brava, se emplaza sobre un abanico aluvial donde se han registrado recurrentes flujos de detritos y avalanchas de nieve, siendo su parte más activa el segmento austral donde los bloques transportados alcanzan hasta 3 m de diámetro. Este tipo de proceso ha generado el represamiento temporal del río Horcones superior en el pasado.



Figura 4: Refugio destruido en campamento Colombia (Fuente: [Moreiras, 2008](#)).

A lo largo del río Horcones inferior existen conos aluviales coalescentes donde se generan y encauzan los flujos de detritos que alimentan el glaciar Horcones inferior. Estas geoformas están mejor desarrolladas en la ladera izquierda del valle, por donde se encuentra la senda a Plaza Francia. En la ladera occidental, en cambio, predominan mayormente los glaciares de escombros y lóbulos de soli-geliflución. Sin embargo, un flujo de detritos proveniente de esta margen se ha depositado y aún se conserva sobre el glaciar reconstituido de Horcones inferior. En el fondo del valle los flujos de detritos descargan directamente sobre el glaciar o encima de los depósitos morénicos.

En la Quebrada de la Vieja (valle del río de Las Vacas), en el año 2002 se generó un flujo de detritos que llegó hasta el río de Las Vacas a partir de una morena por fusión de nieve ([Lisboa, 2011](#)). Cerca del campamento de Plaza Guanacos dos andinistas reportaron un flujo de barro ocurrido en el mes de febrero de 2004. Material fino saturado con agua sale del frente de una morena localizada en la quebrada de la Vieja Alta (área intangible de la reserva) bloqueando parcialmente la quebrada del río de las Vacas (Figura 5). Ejemplos más recientes de este tipo de procesos son los tres eventos reportados durante la temporada 2006/07 en cercanías al campamento Pampa de Leña, donde se produjeron sucesivos aludes y flujos de barro que ocasionaron serios problemas para la circulación de visitantes y mulas. Estos eventos también estuvieron relacionados a endicamientos temporales del Río de las Vacas ([Lisboa, 2011](#))



Figura 5. Flujos de detritos en la quebrada de la Vieja Alta (Fotos F. Díaz) (en [Moreiras, 2008](#))

En septiembre de 2008, se observó un flujo de detrito originado casi en la desembocadura de la quebrada del río de Las Vacas.

[Randis \(2012\)](#) identificó 20 endicamientos en los valles del área protegida. Estos endicamientos son por lo general pre-históricos, evidenciados por el estrechamiento del valle o el desarrollo de amplias llanuras aluviales aguas arriba del antiguo represamiento. Muchos de estos represamientos se han originado por flujos de detritos históricos y han sido reportados por los mismos guardaparques como en el caso del lago generado en el río de Las Vacas en 2006/2007 a la altura de Pampa de Leñas. En tanto los conos/abanicos aluviales identificados (Figura 6) abarcan amplias superficies con un total de 19,1 km². Estas geoformas constituyen el 2,2 % de la reserva, evidenciando la vulnerabilidad de estos sectores a ser afectados por flujos de detritos. Si bien los flujos de detritos se encuentran canalizados en los sectores más activos del abanico/cono aluvial, eventos violentos con un volumen inusual podrían irrumpir en superficies estabilizadas generando nuevos canales activos ([Randis, 2012](#)).



Figura 6: a) cono aluvial valle del río de Las Vacas, camino entre Pampa de Leña y Casa de Piedra. b) cono aluvial Quebrada Guanaco (Fuente: [Randis, 2010](#)).

4.4. Conceptos de Peligrosidad, Susceptibilidad y Riesgo

4.4.1. Riesgo

Combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas ([UNISDR, 2009](#)). Por riesgo en general se entiende a la existencia de una condición objetiva latente que anuncia probables daños y pérdidas futuras, anuncia la probabilidad de ocurrencia de un evento considerado de alguna forma negativa, y/o un contexto que puede acarrear una reducción en las opciones de desarrollo pleno de algún elemento o componente de la estructura social y económica. Siempre implica una condición latente asociada con algún grado de incertidumbre. Por riesgo de desastre en particular se entiende como la probabilidad de daños y pérdidas futuras asociadas con el impacto de un evento físico extremo sobre una sociedad vulnerable ([Lavell, 2003](#)).

4.4.2. Gestión de riesgos

Es una estrategia, resultado de un comportamiento multidisciplinario y multisectorial. Abarca la evaluación y el análisis del riesgo, al igual que la ejecución de estrategias y de acciones específicas para controlar y reducir el riesgo (UNISDR, 2009).

4.4.3. Vulnerabilidad

Las características y circunstancias de una comunidad, sistema o bien que los hacen susceptibles a los efectos dañinos de una amenaza (UNISDR, 2009).

4.4.4. Peligrosidad

La peligrosidad es la probabilidad de ocurrencia de un proceso potencialmente perjudicial dentro de un período de tiempo determinado y en un área específica (Varnes, 1984). Por tanto, la evaluación de la peligrosidad vinculada a procesos de remoción en masa implica localizar las áreas inestables y las potencialmente inestables. Esto, a su vez, requiere determinar el tipo de proceso, su magnitud y posible desplazamiento ladera abajo, así como los factores relacionados con la estabilidad e inestabilidad. Por otro lado, es preciso estimar la frecuencia de ocurrencia en el tiempo (Bonachea Pico, 2006).

Existen diversas técnicas de estimación de la peligrosidad basadas en el principio del actualismo “el estudio del pasado y del presente es la clave de lo que puede ocurrir en el futuro”. Es decir que a partir del conocimiento detallado del comportamiento en el pasado de los procesos (archivos históricos, estudios geomorfológicos, etc.), podemos predecir el comportamiento en el futuro ya que se supone, que se producirán bajo condiciones similares a las que se produjeron en el pasado y las que producen en el presente (Bonachea Pico, 2006).

4.4.5 Susceptibilidad

La susceptibilidad es la potencialidad de un terreno o área a la ocurrencia de eventos perjudiciales y no implica el aspecto temporal del fenómeno (Lana, *et al* 2004 citado en Cereceda, 2006). Constituye el primer paso para la evaluación de la peligrosidad. Este concepto expresa, generalmente, la facilidad con que un fenómeno puede ocurrir sobre la base de las condiciones locales del terreno (Suárez, 2009).

Ayala-Carcedo (2002), define la susceptibilidad como la predisposición de una zona a ser afectada por procesos de remoción en masa a través de un análisis comparativo de factores condicionantes y/o desencadenantes, con los terrenos o áreas afectadas, análisis que se materializa normalmente en forma de mapa de susceptibilidad y suele presuponer que el comportamiento futuro del terreno seguirá las mismas pautas que hasta el presente.

4.4.5.1. Evaluación de la susceptibilidad

Para llevar a cabo la evaluación de la susceptibilidad en un área determinada y establecer una zonificación, es necesario identificar y mapear ciertas variables geoambientales como variables

geológicas, geomorfológicos, climáticas y, posteriormente, estimar la contribución relativa de cada variable a la ocurrencia de los eventos para finalmente lograr una zonificación de susceptibilidad de un área determinada (Esper Angillieri, 2010). No existe una regla a seguir en cuanto al número de variables a considerar en el análisis. Por ejemplo, Carrara *et al.* (1991), utilizaron más de 20 variables en un estudio de predicción de áreas propensas a movimientos en masa, desarrollado en Italia aplicando un método estadístico. Otros, como Grupta y Joshi (1990) (citado en Gómez *et al.*, 2003), han utilizado sólo geología y pendiente en los Himalayas, para modelos creados en ambiente SIG con fines predictivos. En reglas generales, puede afirmarse que el número de variables tiende a ajustarse a la realidad del área bajo estudio, a la disponibilidad de la data original y de los equipos y software adecuados para la recolección y procesamiento de la misma. La tendencia es, sin embargo, a utilizar factores promotores e inhibidores de la inestabilidad. Pueden mencionarse cobertura vegetal, elevación, pendiente, longitud de la vertiente, índice de humedad, orientación, suelos y geología. Estas variables pueden ser estimados a partir de tres fuentes básicas: mapas temáticos, imágenes de satélites y modelos digitales de elevación (Gómez *et al.*, 2003).

Cereceda (2006) considera tres aspectos importantes en el estudio de la susceptibilidad: el inventario de los deslizamientos, topografía de la zona de estudio y el análisis de los factores de ocurrencia.

La metodología usada para el estudio de la susceptibilidad consiste básicamente en un proceso de análisis de los factores que condicionan la ocurrencia de los eventos y cómo se interrelacionan. Los sistemas de información geográfica permiten realizar dicho análisis mediante superposición de mapas temáticos de los diferentes factores condicionantes, gracias al establecimiento de bases de datos asociadas (Cereceda, 2006). Los SIG constituyen una herramienta idónea, tanto para el procesamiento y generación de parámetros, como para el análisis de áreas inestables (Gómez *et al.*, 2003).

4.4.5.2. Mapas de susceptibilidad

Son representaciones gráficas que nos muestran qué áreas poseen mayor o menor probabilidad a sufrir procesos de remoción en masa. En la elaboración de estos mapas se tienen en cuenta aspectos espaciales y no los temporales, por lo tanto no informan sobre la probabilidad de ocurrencia en el tiempo. El mapa de susceptibilidad clasifica la estabilidad relativa de un área, en categorías que van de estable a inestable. Nos muestra dónde hay o no, condiciones para que puedan ocurrir los eventos (Suárez, 2009).

En la investigación se utiliza por un lado un mapa o imagen que contiene el inventario de los movimientos en masa, y por el otro, los factores que pueden estar incidiendo en la ocurrencia del movimiento. El modelo computacional, con la información de base ingresada, selecciona aquellos sectores que agrupan factores y categorías específicas similares a aquellas donde, en otro espacio, bajo las mismas condiciones, ocurrió un movimiento en masa, por lo tanto sugerirá que éste es un sector propenso al movimiento. Por el contrario, donde no se reúnan

similares condiciones para el posible movimiento, los considerará como estables. Los resultados se presentan en un mapa con diversos intervalos de susceptibilidad (Gómez *et al.*, 2003).

4.4.5.3. Métodos para estimación de susceptibilidad

Los métodos para la estimación de la susceptibilidad pueden clasificarse en:

- **Métodos Estocásticos:** el análisis de la ocurrencia de PRM se realiza utilizando observaciones geológicas y geomorfológicas y modelos basados en tratamiento estadísticos, se basan en parámetros empíricos. Dentro de éste existen diferentes técnicas pero todas ellas se basan el principio de actualismo. Este principio solo es aplicable cuando se conocen las condiciones pasadas y presentes que originan dicha inestabilidad y se tenga la seguridad de que esas condiciones son las mismas, o bien los posibles cambios puedan ser identificados y evaluados (Esper Angillieri, 2010).
- **Métodos Deterministas:** se basan en leyes físicas y mecánicas universales de conservación de masa, energía y equilibrio de fuerzas. Involucran la estimación de valores cuantitativos de las variables de estabilidad (por ejemplo el factor de seguridad) sobre un área bien definida. Estos sólo pueden ser aplicados cuando las condiciones geomorfológicas y geológicas son bastante homogéneas en toda el área de estudio y los tipos de PRM son sencillos. Su ventaja radica en que poseen un fundamento físico y su principal inconveniente es el alto grado de simplificaciones. Obtiene información sobre el grado de estabilidad de las laderas a partir de parámetros mecánicos e hidrológicos del suelo, así como también permite alcanzar un modelamiento del comportamiento de las laderas bajo diferentes regímenes de precipitación (Cereceda Quintanilla, 2006). Requieren el conocimiento del espesor del suelo, su resistencia, la profundidad de la superficie de rotura, la pendiente del talud y las condiciones de presión de agua en los poros que se espera tener en la superficie de rotura (Esper Angillieri, 2010).

4.4.5.3.1. Métodos Estocásticos

Entre los métodos estocásticos pueden destacarse los siguientes (modificado de Irigaray y Chacón, 2002 citado en Esper Angillieri, 2010):

a) Los basados en el análisis de distribución de los PRM

Son métodos directos basados en la interpretación de fotografías aéreas, imágenes satelitales, investigación en el campo y/o una base de datos de los registros históricos de una determinada zona. El producto final es un mapa de distribución espacial de los PRM.

b) Los basados en la densidad de PRM

En estos se representa el porcentaje de que una determinada unidad del terreno aparece afectada por PRM. Son necesarios como datos de entrada el mapa inventario y el de unidades del terreno.

c) Los basados en el análisis geomorfológico o directos

El grado de susceptibilidad se evalúa en cada punto sobre el terreno. Se basan en la determinación de condiciones de inestabilidad de ladera mediante técnicas geomorfológicas, cartografía y zonificación. Con las observaciones, el experto extrae criterios para la determinación de áreas potencialmente inestables y para la confección del mapa de susceptibilidad, basado en un índice de susceptibilidad que viene indicado por la presencia o ausencia de PRM en el terreno. La principal ventaja es la validez y detalle del análisis y mapa resultantes, en el caso de estar realizados por un buen experto. El inconveniente de estos métodos es el alto grado de subjetividad dependiente de la experiencia del autor.

d) Los basados en el análisis cualitativo

Se basan en categorizar y ponderar cualitativamente los factores causantes de inestabilidad según la influencia esperada de éstos en la generación de PRM, estiman la susceptibilidad relativa según una ponderación definida por el autor para cada factor. Normalmente los distintos factores se cartografían en mapas temáticos separados que luego se combinarán para obtener el mapa de susceptibilidad. El principal inconveniente es el grado de subjetividad que se introduce cuando se seleccionan y se ponderan los factores que contribuyen a la ocurrencia de PRM y el costo en tiempo y dinero para la adquisición de los datos necesarios (Carrara, 1984).

e) Los basados en el análisis estadístico univariante y bivariante

Estos métodos estadísticos presentan un mayor grado de objetividad y los mapas resultantes pueden ser reproducidos por cualquier investigador. En estos métodos cada factor o variable condicional y desencadenante es comparado con el mapa inventario de PRM. El peso asignado (ponderación) para categorizar cada variable es determinado en base de la densidad de PRM en las clases individuales de cada variable seleccionada. Se trata del análisis cruzado de los mapas de variables utilizados. La importancia de cada variable puede ser analizada individualmente en función de la relación entre el inventario y dichas variables, para obtener una probabilidad condicionada de cada variable a la presencia o ausencia de PRM.

Uno de los métodos más usados para la determinación de pesos es el **statistical index (Wi) method** de **Van Westen, 1997**. Se basa en una ponderación definida cuantitativamente (van Westen, 1994). Es definido mediante la ecuación 1 como el logaritmo de la densidad de PRM para una clase sobre la densidad de PRM para el área total de estudio. El logaritmo natural es

usado para dar un peso negativo cuando la densidad de PRM es más baja que lo normal, y positivo cuando sea más alta que lo normal. Los pesos son calculados para cada clase en cada variable temática, luego todos los mapas temáticos o variables son combinados para la obtención del mapa de susceptibilidad a la ocurrencia de PRM, el cual es reclasificado en clases de susceptibilidad.

$$W_i = \ln \left(\frac{Densclas}{Densmap} \right) = \ln \left(\frac{Npix(S_i)/Npix(N_i)}{\sum_{i=1}^n Npix(S_i)/\sum_{i=1}^n Npix(N_i)} \right) \quad (1)$$

Donde:

W_i = el peso asignado a una variable específica

$Densclas$ = densidad de flujos para la clase de la variable considerada

$Densmap$ = densidad de flujos para el área de estudio

$Npix(S_i)$ = el número de píxeles que contienen flujos en la clase de la variable temática

$Npix(N_i)$ = el número de total píxeles dentro de la zona de estudio, para la clase de la variable considerada.

f) Los basados en el análisis estadístico multivariante

Se basa en la presencia o ausencia de PRM dentro de una determinada unidad del terreno y estudian la interacción y dependencia de un conjunto de factores que actúan simultáneamente en la ocurrencia de PRM, para establecer la influencia que tienen cada uno de ellos. Las técnicas estadísticas más utilizadas son la regresión múltiple y el análisis discriminante. El **análisis discriminante** permite separar varias poblaciones de una misma muestra caracterizadas por las mismas variables a partir de la función discriminante. Ésta es una combinación lineal de las variables independientes que refleja el distinto comportamiento de los individuos dentro de la muestra. El análisis discriminante tiene en cuenta solo datos de naturaleza continua. **La regresión múltiple** por su parte, considera una única población y varios grupos de variables, siendo útil cuando se buscan relaciones explicativas entre diversas variables. El método determina la influencia de un grupo de variables independientes sobre una o más variables dependientes (Baeza, 1994 citado en Esper Angillieri, 2010).

Un tipo de regresión múltiple muy utilizado es la **regresión logística**, que es útil para modelar la probabilidad de un evento ocurriendo como función de otros factores, porque la variable dependiente puede ser cualitativa como cuantitativa o una combinación de ambas y no debe necesariamente presentar una distribución normal. La regresión logística relaciona una serie de variables predictoras con la ocurrencia o no de PRM y utiliza esta relación para la creación de un mapa de probabilidad. Además, el modelo de regresión logística tiene la capacidad de eliminar el factor causal no relacionado y evaluar la importancia de los relacionados (Beguería y Lorente 2002; Mathew *et al* 2005 Clerici, y Dall'Olio 1995 citados en Chauhan, 2010).

La regresión logística establece una relación funcional entre la localización del proceso codificada de manera binaria, ocurrencia (1) o no (0) de PRM y los diferentes factores que

juegan un papel importante en la producción del proceso (Dai y Lee, 2002 citado en Esper Angillieri 2012).

El modelo logístico que representa la máxima probabilidad puede ser expresado en su forma más simple como (Akgun, 2012):

$$p = \frac{1}{1+e^{-y}} \quad (2)$$

Donde p es la probabilidad estimada de que ocurra un evento. Con la ecuación 2 se puede expresar la probabilidad de que cualquier píxel será susceptible a la ocurrencia de un PRM, dada la presencia de las variables independientes.

Debido a que y puede variar desde $-\infty$ a $+\infty$, la probabilidad varía de 0 a 1 como una curva en forma de S. La variable y se define como

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_px_p \quad (3)$$

Donde b_0 es la constante y b_1, b_2, \dots, b_p son los coeficientes de las variables independientes x_1, x_2, \dots, x_p . La variable dependiente (y) para este análisis es la ausencia o la presencia de un evento.

En función de las Ecuaciones 2 y 3, la regresión logística puede ser escrita de la siguiente forma extendida:

$$\log\left(\frac{p}{1-p}\right) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_px_p \quad (4)$$

El modelo de regresión logística consta de cuatro pasos principales: el primer paso consiste en la identificación de las categorías de los factores causales responsables de la aparición de los PRM; en el segundo paso el modelo estima la contribución relativa de cada una de estas categorías causando fallas en las pendientes y establece una relación entre las categorías y los PRM. Luego, basándose en una prueba estadística significativa las categorías más influyentes son seleccionadas, y finalmente, el modelo predice la susceptibilidad a la ocurrencia de un PRM en una región (Chauhan, 2010).

En la interpretación de los resultados se suele usar el concepto de **Odds-ratio** o *coeficiente de probabilidades* para profundizar más en la interpretación de los estimadores. Este concepto asocia la probabilidad de ocurrencia con la de no ocurrencia.

$$odds = \frac{P(Y = 1)}{1 - P(Y = 1)} = \exp(\beta_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_K X_K) \quad (5)$$

$$Odds - ratio = \frac{odds_2}{odds_1} = \exp(\beta_i) \quad (6)$$

De la expresión anterior se deduce que un coeficiente β_i cercano a cero equivaldrá a un *odds-ratio* cercano a uno, esto significará que cambios en la variable explicativa X_i asociada no tendrán efecto alguno sobre la variable dependiente Y . Valores de *odds-ratio* mayores que uno significará que la variable independiente aumenta la probabilidad de ocurrencia de la variable dependiente, por el contrario, valores de *odds-ratio* menores que uno implicarán que la variable independiente disminuye la probabilidad de ocurrencia de la variable dependiente.

4.4.5.3.2. Métodos deterministas. Modelos de base física

Los modelos de base física son ampliamente utilizados para evaluar la susceptibilidad a flujos de detritos (Wu y Sidle, 1995; Burton y Bathurst, 1998; Crosta y Frattini, 2003 citados en Carrara *et al.*, 2008; Montgomery y Dietrich, 1994;) De hecho, estos modelos son aplicados con éxito y más frecuentemente que los enfoques empíricos y estadísticos (Irrigaría *et al.*, 1999. Dai y Lee, 2001; Baeza y Corominas, 2001, Lee *et al.*, 2002 citados en Carrara *et al.*, 2008).

SINMAP

SINMAP (*Stability Index MAPPING*), es un modelo creado por Pack *et al.*, (1998), de la Universidad de Utah en Estados Unidos. Consiste en una extensión, que corre con el programa ArcView, la cual sirve para evaluar áreas potenciales a sufrir movimientos en masa. El modelo calcula y asigna un índice de estabilidad de taludes en base a información geográfica, principalmente modelos digitales de elevación (MDE). Tiene su fundamentación en la teoría de vertientes estables (Gómez *et al.*, 2003). Requiere como datos de entrada:

- La topografía del terreno en un MDE en formato grid, de donde se derivan la pendiente del terreno, así como también las áreas con potenciales condiciones de humedad (índice de humedad), estimadas a partir de las características topográficas que facilitan la convergencia del flujo de agua.
- Inventario de eventos en un formato vectorial de puntos, utilizado en la calibración del modelo.

Otros parámetros del modelo son la fricción del suelo (Φ), transmisividad (T), cohesión del suelo por el sistema radical (C) y recarga de agua (R), los cuales no son requeridos en valores precisos, sino que se especifican en términos de límites superiores e inferiores de los rangos que pueden tomar. De esta manera el modelo permite cierto grado de incertidumbre, siendo adecuada una interpretación de los resultados en términos de riesgo relativo. Estos límites definen las distribuciones uniformes de probabilidad sobre la cual, estos parámetros se supone que varían al azar. Esto es para subsanar el hecho de que la distribución de los parámetros es variable en tiempo y espacio (Zaitchik *et al.*, 2003 citado en Muñiz-Jauregui, *et al.*, 2012), por lo que los valores predeterminados son calibrados con referencia a la inestabilidad superficial e histórica registrada en el mapa inventario (Muñiz-Jauregui *et al.*, 2012).

El índice de estabilidad es representado en una escala numérica la cual es utilizada para clasificar y categorizar la estabilidad del terreno en cada punto del área de estudio (López *et al.*, 2007). El modelo establece seis clases de estabilidad en función de los valores que tome el índice de estabilidad (**SI**) (Tabla 2).

Tabla 2: definición de las clases de estabilidad

Condición	Clase	Predicción de estado
$SI > 1,5$	1	Estable
$1,5 > SI > 1,25$	2	Moderadamente estable
$1,25 > SI > 1,0$	3	Casi estable (baja estabilidad)
$1,0 > SI > 0,5$	4	Límite inferior de estabilidad (baja inestabilidad)
$0,5 > SI > 0,0$	5	Límite superior de estabilidad (inestabilidad media)
$0,0 > SI$	6	Alta inestabilidad

Fundamento teórico:

Todos los detalles del modelo SINMAP están disponibles en Pack *et al.* (1998). En esta sección se presenta un resumen del enfoque del modelo mencionado.

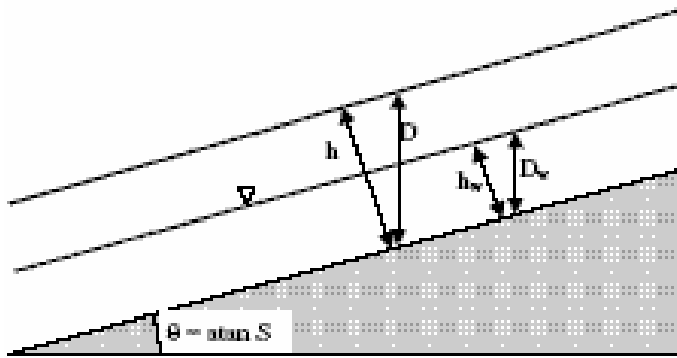
SINMAP está basado principalmente en el concepto de *Factor de seguridad* (FS), donde el FS se define como la relación que existe entre la resistencia al corte del suelo o roca y los esfuerzos cortantes a lo largo de una superficie de falla (Pack, *et al* 1998).

La base teórica del modelo es la relación entre un modelo de estabilidad infinita de taludes y un modelo hidrológico en estado estacionario (TOPMODEL) representado por un parámetro de índice de humedad topográfica (Wawer *et al.*, 2003).

- **Modelo de estabilidad infinita de taludes:**

Se basa en el equilibrio o balance de las componentes de gravedad (componentes desestabilizadoras) con las fuerzas de fricción y cohesión (componentes estabilizadoras) sobre un plano paralelo a la superficie del talud (suelo). El factor de seguridad (SF) calculado en SINMAP es:

$$SF = \frac{C + \cos \theta (1 - wr) \tan \phi}{\sin \theta} \quad (7)$$



$$h = D \cos \theta \quad (8)$$

$$w = D_w / D = h_w / h \quad (9)$$

$$C = (C_r + C_s) / (h \rho_s g) \quad (10)$$

$$r = \rho_w / \rho_s \quad (11)$$

Figura 7. Relaciones geométricas del principio de estabilidad infinita de taludes.

Donde:

C_r : Cohesión de raíz [N/m^2]; C_s : cohesión del suelo [N/m^2]; θ : ángulo de la pendiente; ρ_w : densidad del agua [kg/m^3]; ρ_s : densidad del suelo húmedo [kg/m^3]; g : aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$); D : profundidad vertical del suelo [m]; D_w : altura vertical del nivel de agua dentro de la capa de suelo [m]; ϕ : ángulo de fricción interna del suelo [-]; h : espesor del suelo perpendicular a la pendiente [m]; h_w : espesor del nivel de agua dentro de la capa de suelo perpendicular a la pendiente [m].

En la práctica, el modelo determina la pendiente y humedad en cada punto de la red, y supone que los demás parámetros se mantienen constantes (o tienen distribuciones de probabilidad constantes) en zonas más extensas. Con la forma de la ecuación (7) esto equivale a asumir implícitamente que el espesor del suelo (perpendicular a la pendiente) es constante.

- **Modelo Hidrológico (TOPMODEL)**

El modelo incorpora el concepto de área de captación específica "a" (desarrollado por [Beven y Kirkby, 1979](#)) que se define como el área de pendiente ascendente por unidad de longitud de contorno [m^2/m].

Este concepto sigue las observaciones de campo de que la mayor humedad del suelo o áreas de superficie saturada tienden a ocurrir en áreas convergentes. El contenido de humedad del suelo varía de acuerdo a la topografía de la zona, la vegetación y el clima; por tanto, cuanto más grande sea el área expuesta a las lluvias y menor sea su inclinación, la humedad será mayor ([Cereceda, 2006](#)).

TOPMODEL se fundamenta en la influencia que ejercen los parámetros hidrológicos sobre la estabilidad de un talud incorporando el **índice de humedad topográfica** por medio de los siguientes supuestos:

- el escurrimiento subsuperficial sigue gradientes topográficos. Esto implica que el área que contribuye al flujo en cualquier punto viene dada por la zona de captación específica definida a partir de la topografía de la superficie.
- la descarga lateral en cada punto está en equilibrio con una recarga de estado estacionario R [m/hr].
- la capacidad de flujo lateral en cada punto es $T \text{ sen } \theta$, donde T es la transmisividad del suelo [m^2/hr], es decir, la conductividad hidráulica [m/hr] por el espesor del suelo, h [m]. La transmisividad y el ángulo de talud rigen el comportamiento del área de captación.

El índice topográfico refleja la tendencia del agua a acumularse en cualquier punto en la cuenca (en términos del área de contribución) y la tendencia de las fuerzas gravitacionales de mover el agua hacia abajo (Quinn *et al.*, 1991 citado en Aristizábal, 2010). Este índice tiene un límite superior de 1 con cualquier exceso supone formación de flujo superficial por saturación

El **índice de humedad topográfica** está definido por la siguiente ecuación:

$$w = \text{Min}\left(\frac{R a}{T \sin \theta}, 1\right) \quad (12)$$

Donde:

a: área de captación específica

R: recarga [m/h]

T: Transmisividad [m^2/h]

θ : ángulo del talud

- **Definición del índice de estabilidad**

En el modelo SINMAP, el cálculo de FS se logra haciendo uso y reemplazando las ecuaciones de los modelos anteriores, obteniéndose la siguiente relación:

$$FS = \frac{C + \cos \theta \left[1 - \min \left(\frac{R a}{T \text{ sen} \theta}, 1 \right) r \right] \tan \phi}{\text{sen} \theta} \quad (13)$$

Las variables **a** y **θ** son derivadas de la topografía (MDE), la relación de densidades **r** es tratada como constante (con un valor de 0,5), los parámetros **C**, **$\tan \phi$** , **R / T** son introducidas por el usuario en sus valores límites (superior e inferior), de esta manera se permite incertidumbre en estas tres cantidades. Estos límites definen las distribuciones uniformes de probabilidad sobre la cual, estos parámetros se supone que varían al azar.

Las áreas que presentan los peores escenarios poseen un valor de FS mayor que 1 y están, en términos de este modelo, sin condiciones de estabilidad.

Entonces el índice de estabilidad (SI), está definido como la probabilidad de la estabilidad de un talud basado en la distribución de parámetros como C, ϕ , R y T; es decir:

$$SI = \text{Prob}(Fs > 1) \quad (14)$$

Esta es una probabilidad espacial debido a la incertidumbre (variabilidad espacial) en C, tan Φ y T.

5. Descripción del área de estudio

5.1. Localización

El Parque Provincial Aconcagua se encuentra ubicado en el Departamento Las Heras, Mendoza, Argentina. La superficie total es de aproximadamente 71.000 ha. Ubicado entre los 69° 50' Long. Oeste y 32° 48' Lat. Sur en la provincia geológica de la Cordillera Principal en los Andes Centrales. Se encuentra a una distancia de 180 km al oeste de la ciudad de Mendoza.

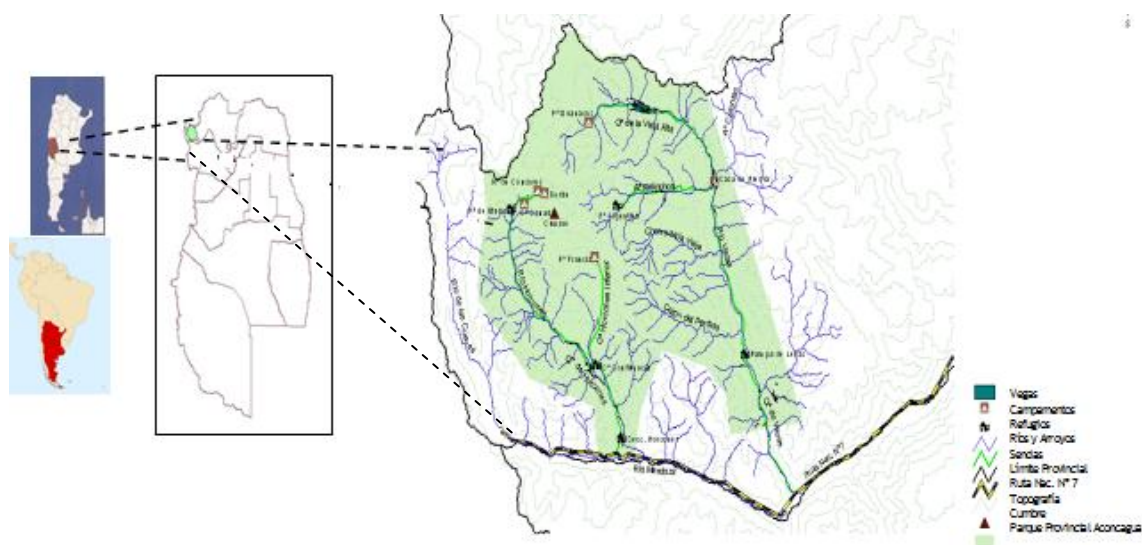


Figura 8: Ubicación del Parque Provincial Aconcagua.

5.2. Vías de acceso

La vía de acceso al Parque Provincial Aconcagua es por la Ruta Nacional 7, partiendo de la ciudad de Mendoza y pasando por las localidades de Potrerillos, Uspallata, Polvaredas, Punta de Vacas, Penitentes y Puente del Inca. El Parque posee dos sitios de ingreso, uno en la localidad de Punta de Vacas a la altura del Km. 1.200 y el principal, por la quebrada de Horcones, en el Km. 1.222,5 ambos sobre la ruta Nacional 7.

5.3. Creación del Parque Provincial Aconcagua

El Parque Provincial Aconcagua forma parte del Sistema de Áreas Protegidas de la Provincia de Mendoza, Argentina. Fue creado en 1983 a través de la Ley 4807/83, se crea con el objeto de conservar la flora y la fauna alto andina y el material arqueológico allí existente. Además, el área posee valiosas reservas de agua dulce contenida en los glaciares y cabeceras de cuencas.

A través del Decreto 1034 creado en 1989, se establece que el Parque será administrado por la Dirección de Recursos Naturales Renovables, con la colaboración de una Comisión Asesora

Permanente, integrada por representantes de distintos organismos. Posteriormente, en 1990, otro instrumento legal, el Decreto 2.819, establece varias normativas relacionadas con la regulación del andinismo fijando aranceles, temporada para los ascensos y sistemas de seguridad, entre otros ítems. La ganancia recaudada es destinada al “Fondo Permanente de Áreas Protegidas” (Ley 6045/93).

El Parque se rige actualmente por la Ley 6045/93, la cual establece que el planeamiento de cada reserva debe realizarse a través de un “Plan de Manejo” donde se desarrolle la política, la zonificación y las actividades a efectuar en las áreas protegidas.

Cuenta hoy en día con una zonificación preliminar que determina los sectores de tránsito, los que fueron seleccionados en función de las rutas de ascenso a la cumbre y los lugares escogidos para la ubicación de infraestructura física. Se establecen tres zonas principales de uso: intensivo, extensivo y restringido. La Quebrada de Horcones está catalogada como zona de uso intensivo (desde la ruta de ingreso hasta la Quebrada del Durazno) y extensivo (desde la Quebrada del Durazno hasta el Campamento Base Plaza de Mulas). La zona de uso intensivo está destinada al turismo en general, permitiéndose “actividades recreativas relativamente intensas”, y la construcción de caminos y accesos para el tránsito de vehículos e instalaciones de apoyo. El área de uso extensivo está destinada a la ascensión y trekking por rutas normales. Éstas incluyen todos los campamentos bases, de altura y las rutas de acceso (Barros, 2004).

5.4. Interés geológico

En cuanto al interés geológico, el área alberga al Cerro Aconcagua cuya elevación es de 6.960,8 msnm., es el punto culminante de la Cordillera de los Andes, constituyendo la mayor elevación del hemisferio occidental y del hemisferio sur. Por tal motivo, ha despertado el interés de numerosos expedicionarios y naturalistas. Actualmente representa un importante destino turístico, el sitio es visitado por miles de montañistas de todas partes del mundo.

En esta región se reconoce una rica variedad de elementos y procesos geológicos, en particular aquellos que llevan a la formación de cadenas montañosas y que nos cuentan una parte fundamental de la historia de Los Andes (SEGEMAR, 2009 citado en Randis 2012).

5.5. Elementos bióticos

5.5.1. Vegetación

La vegetación del área la componen comunidades con fisonomías de matorrales, estepas, pastizales y praderas. Según la clasificación de Cabrera (1976) el área de estudio se puede reconocer dentro del Dominio Andino-patagónico, en la Provincia Alto-andina.

Se reconocen tres distritos que se suceden altitudinalmente: Piso Altoandino Inferior, Altoandino Medio o Nival y Altoandino Superior o Glacial (Méndez *et al.*, 2006). El límite

altitudinal de la vegetación es hasta aproximadamente los 4.000 – 4.500 msnm. (Martínez Carretero y Méndez, 1992).

Los límites entre las comunidades están condicionados principalmente por factores climáticos, geomorfológicos y edáficos. Las comunidades vegetales presentes son cinco: desierto altoandino, estepa herbácea, estepa arbustiva, matorral altoandino y vegas altoandinas, las cuales se describen brevemente a continuación: (Méndez *et al.*, 2006).

- Matorral Altoandino (2.200 a 2.800 msnm.): introducción de especies de la ecorregión del Cardonal. Formación vegetal de estepa cerrada, matorral bajo y abierto. Cobertura del suelo media. Algunas de las especies más representativas son: leña amarilla (*Adesmia pinnifolia*), espina de pescado (*Tetraglochin alatum*) y coronta (*Berberis empetrifolia*).
- Estepa arbustiva altoandina (2.800 a 3.400 msnm.): formación vegetal pastizal mixto, estepa abierta y semiabierta. Cobertura del suelo baja. Especies como: cuerno de cabra (*Adesmia remyana*), coronta (*Berberis empetrifolia*), yareta (*Adesmia subterranea*), yerba loca (*Astragalus spp.*) y huecu (*Poa spp.*).
- Estepa herbácea altoandina (3.400 a 3.800 msnm.): formación vegetal pastizal abierto, plantas aisladas y postradas. Cobertura del suelo muy baja. Escarapela (*Chaetanthera spatulifolia*), cola de quirquincho (*Nassauvia lagascae*), *Senecio spp.*
- Desierto altoandino: el suelo está totalmente desnudo, desde los 3.800 msnm. aparecen algunos individuos aislados hasta los 4.500 msnm. aproximadamente, representados por *Viola sp.* y *Nassauvia sp.*
- Vegas altoandinas (2.000 a 3.800 msnm.) Formación bofedales y pastizales altos. Cobertura del suelo total. Pastos, juncáceas y ciperáceas. Se desarrollan en las zonas de mayor humedad (vertientes) y presentan una mayor diversidad que los sitios más secos.

Dentro de la vegetación de la zona, se destacan también las comunidades acuáticas, constituidas principalmente por grupos algales como clorofíceas, cianofíceas y diatomeas. Estas comunidades presentan marcada estacionalidad, ya que se encuentran sujetas al régimen dimíctico de los cuerpos de agua (congelamiento y deshielo) (Peralta y Claps, 2001).

La mayor presión antrópica en el valle se revela con la presencia de un buen número de especies exóticas (Méndez *et al.*, 2006).

En la tesis de Randis (2012) se reconocieron ochenta y siete (87) vegas o humedales de altura en toda el área de estudio. Las mismas poseen un mayor desarrollo y superficie en el valle del río de Las Vacas, donde se identificaron ochenta (80) vegas (68,1 ha, 0,1 %). En cambio en el valle del río Horcones la cantidad de vegas no supera las siete (7) afectando 10,1 ha, o sea 0,02 % de toda la cuenca.

Algunas de las actividades desarrolladas dentro del Parque, tales como el pisoteo y pastoreo de las mulas de carga, el tránsito no ordenado de visitantes, las actividades de campamentos, entre otros; pueden generar una diversidad de impactos sobre la vegetación y el suelo del área (disminución de la cobertura vegetal, erosión del suelo, presencia de especies exóticas) (Martínez Carretero 1988, Quiroga 1996 citado en Barros, 2004).

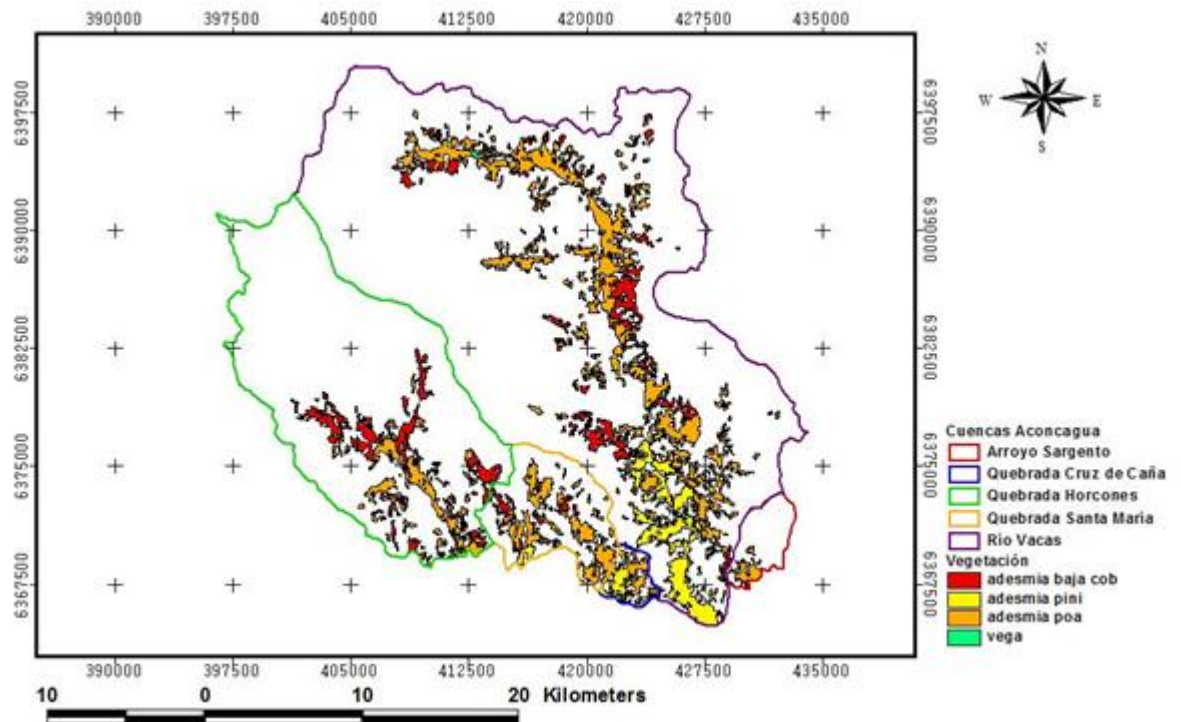


Figura 9: Mapa de vegetación del Parque Aconcagua (Fuente: Zalazar *et al.*, 2007).

5.5.2. Fauna

La fauna del área es típicamente altoandina, los animales están adaptados a las condiciones hostiles de la región. Las especies más representativas son el Cóndor Andino (*Vultur gryphus*) y el Guanaco (*Lama guanicoe*), que se presenta en las zonas más alejadas durante el verano y bajando a alimentarse durante los meses de invierno, donde las temperaturas son más benéficas. Otro habitante característico de la zona es el Chinchillón (*Lagidium viscacia*), el cual se lo puede encontrar en lugares rocosos. (Olivera y Lardelli, 2009).

Entre los carnívoros encontramos al Puma (*Puma concolor*), a los Zorros Colorados (*Pseudopalex culpaeus*), que prefieren zonas alejadas a los centros urbanos y al Zorro Gris (*Pseudopalex griseus*) en las cercanías de los poblados. (Olivera y Lardelli, 2009).

Los reptiles y anfibios están representados por muy pocas especies como la Lagartija del Aconcagua (*Liolaemus fitzgeraldi*) y el Lagarto Cola de Piche del Aconcagua (*Phymaturus flagellifer*) especies exclusivas de esta zona (Chebez *et al.* 2005 citado en Randis, 20012) y el Sapo Andino (*Bufo spinolosus*) los cuales están activos solo durante los meses más calurosos del verano.

Algunos de los roedores que se pueden encontrar en el área de estudio, son Ratoncito Andino (*Akodon andinus*), la Rata Chinchilla (*Abrocoma cinerea vacarum*), el Lauchón Orejudo (*Phyllotis darwini*) y la Rata de los Andes (*Aconaemys fuscus fuscus*). (Olivera y Lardelli, 2009).

Entre las especies exóticas, se encuentra la Liebre de Castilla o Europea (*Lepus europeus*), el Gorrión (*Passer domesticus*) y la Paloma Domestica (*Columba livia*), estos últimos de aparición reciente dentro del área. Algunos ríos y arroyos son el hábitat de la Trucha Arco Iris (*Onchorhynchus mykiss*) (Olivera y Lardelli, 2009).

5.6. Organización del Parque Provincial Aconcagua y vías de ascenso

Existen dos vías o senderos posibles para el ingreso al Parque Aconcagua: por el Valle del Río Horcones, desde donde se puede ascender por la pared sur o por la ruta noroeste, y por el Valle del Río Vacas, desde donde se asciende por la ruta este.

La vía más habitual es por la Quebrada de Horcones. Al llegar al campamento de Confluencia se pueden escoger dos caminos, por un lado, para realizar el ascenso por la Pared Sur del cerro, se puede acceder a Plaza Francia bordeando el glaciar Horcones Inferior. La segunda opción es continuar por Playa Ancha hacia Plaza de Mulas, desde aquí parte la ruta noroeste que es la de menor dificultad y la más usada para alcanzar la cima.

Por la Quebrada del Río Vacas se accede a Plaza Argentina, desde donde se realiza la denominada Ruta de los Polacos para alcanzar la cumbre por el este.

El parque se encuentra organizado en once campamentos (Tabla 3), algunos de estos cuentan con seccional de guardaparque donde se brindan los servicios de información y atención al visitante, y servicios médicos.

Tabla 3: Campamentos principales del Parque Provincial Aconcagua.

Campamentos en la Quebrada de Horcones				
Horcones (2.850 msnm)	Confluencia (3.400 msnm)	Plaza Francia (4.100 msnm)	Plaza de Mulas (4.350 msnm)	Nido de Cóndores (5.560 msnm)
- Sitio más visitado. - Principal ingreso a la Laguna de Horcones. - Seccional de guardaparques. - Presencia de vegas y pequeñas lagunas: Laguna de Horcones, Laguna Espejo y Laguna Escondida.	- Campamento de aproximación. -Seccional de guardaparques - Flujo importante de andinistas, zona de acampe. - Presencia de dos sistemas de Vegas importantes con pequeñas lagunas temporarias.	- Ubicada en la base de la pared sur del Cº Aconcagua y el glaciar Horcones Inferior. - Se encuentra la nacimiento del Río Horcones Inferior.	- Campamento base importante. -Seccional de guardaparques. - Presencia de glaciares importantes. - Naciente del río Horcones Superior.	- Principal campamento de altura por la ruta normal. -Presencia de patrulla de rescate. - Congrega a numerosos andinistas.

Campamentos en la Quebrada de Vacas					
Punta de Vacas (2.400 msnm)	Pampa de Leñas (2.850 msnm)	Casa de Piedra (3.240 msnm)	Plaza Argentina (4.190 msnm)	Campo I (4.880 msnm)	Plaza Guanaco o Fondo del Valle (3.750 msnm)
<ul style="list-style-type: none"> -Ingreso a la Quebrada del Río Vacas. -Sitio de paso, sin zona e acampe. -Muy pastoreada por vacas y mulas. -Cercano al poblado de Punta de Vacas. 	<ul style="list-style-type: none"> -Primera seccional de guardaparques en la quebrada Río Vacas. -Lugar con zona de acampe. -Gran impacto por pastoreo y extracción de leña. - Cuenta con pequeños sistemas de vegas. 	<ul style="list-style-type: none"> -Seccional de guardaparques. -Lugar con zona de acampe. -Gran impacto por pastoreo y extracción de leña. 	<ul style="list-style-type: none"> -Campamento base de la Pared este. -Seccional de guardaparques -Posee sitio de acampe. 	<ul style="list-style-type: none"> -Principal Campamento de Altura de la ruta Este del Cerro Aconcagua. 	<ul style="list-style-type: none"> Es el área intangible del Parque Provincial Aconcagua. -No existen campamentos ni tránsito de andinistas. -Presencia de vegas altoandinas de gran superficie.

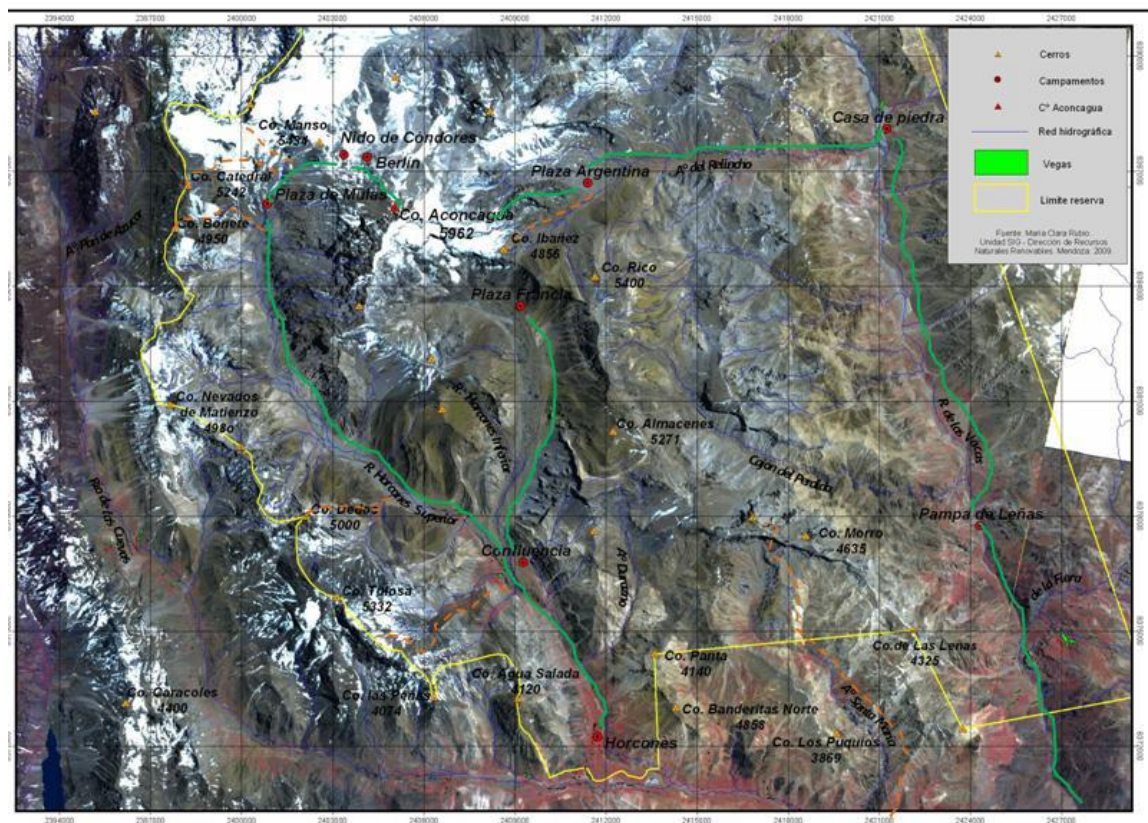


Figura 10: Ubicación de campamentos e Infraestructura en el Parque Provincial Aconcagua. Línea amarilla corresponde a los límites de parque, líneas verdes a las rutas principales que utilizan los andinistas y las líneas anaranjadas a rutas alternativas. (Fuente: Dirección de Recursos Naturales Renovables, 2009).

5.7. Actividades que se desarrollan en la Zona

Las principales actividades deportivas y turísticas que se realizan en el PPA incluyen el ascenso (15-20 días de duración), senderismo por el circuito de la Laguna de Horcones (2 km de distancia y 1 hora de duración), trekking largo (7 días), trekking corto (3 días) y trekking diario (1 día).

En el Valle de Horcones el trekking largo permite acampar en Confluencia y Plaza de Mulas, el trekking corto permite acampar en Confluencia y conocer por el día Plaza Francia, por último, el trekking diario permite el ascenso desde Horcones hasta el campamento de aproximación Confluencia.

En el Valle del Río Vacas el trekking largo permite acampar en Pampa de Leñas, Casa de Piedra y Plaza Argentina, el trekking corto permite acampar en Pampa de Leñas y acampar y conocer Casa de Piedra, por último, el trekking diario permite el ascenso hasta el campamento de aproximación Pampa de Leñas.

5.8. Población dentro del Parque Provincial Aconcagua

La población del Parque varía de acuerdo a la época del año. Durante los meses de invierno (abril a octubre), la actividad dentro del parque es mínima, los únicos campamentos que se encuentran habilitados y con personal permanente de la Dirección de Recursos Naturales Renovables (DRNR) de la Provincia son Horcones y Punta de Vacas.

Durante la estación cálida (noviembre a marzo) se produce la mayor actividad dentro del Parque. La población del mismo se puede dividir en dos grandes grupos: el personal prestador de servicios y los visitantes. El primero incluye guardaparques, vaqueanos, empresas privadas prestadoras de servicios, rescatistas y personal del servicio médico, los mismos permanecen en el parque durante toda la temporada (4 meses) y sumaron alrededor de 400 personas en la temporada 2009/10 (comunicación verbal con Licenciado Romano). El segundo incluye turistas, andinistas e investigadores, entre otros. Los visitantes tienen un tiempo de permanencia variable dentro del Parque que va de 1 a 20 días, de acuerdo a la actividad que realicen (Lisboa, 2011).

La cantidad de visitantes oscila entre los 6.000 y 7.000 por temporada, llegando a superar los 7.500 para las actividades de trekking y los 60.000 para la visita a la Laguna de Horcones y sus alrededores en la temporada 2007/08. (Records y Estadísticas, Parque Provincial Aconcagua, DRNR 2009)

5.9. Clima

El relieve alto andino marca una variada influencia en el régimen termopluviométrico debido a las diferentes altitudes, pendientes, exposiciones, etc. determinando microclimas. Se observan grandes variaciones de los registros climáticos en cortos recorridos y periodos.

El clima es influenciado por la circulación atmosférica del Anticiclón del Pacífico, la dinámica térmica topográfica de la Depresión del Noroeste Argentino (DNOA) en la vertiente oriental de los Andes, el anticiclón del Atlántico en menor medida, y la circulación del aire del oeste en la parte sur de la región. (Compagnucci *et al.*, 2002).

Según Koeppen (1931) el clima del Parque Aconcagua corresponde a Tundra entre los 2.700 y 4.100 msnm y a clima Polar de hielos eternos a cotas superiores.

El clima de Tundra se caracteriza por un suelo congelado de abril a septiembre y una temperatura media mensual de menos de 0°C. El frío no permite el crecimiento de árboles, pero las temperaturas medias de verano permiten el desarrollo de la vegetación herbácea subarborescente.

En el Clima Polar de hielos eternos la temperatura media mensual nunca supera los 0 °C. El suelo permanece congelado todo el año y las precipitaciones níveas son de 400 a 600 mm.

Precipitación

Los valores de precipitación anual para la zona del Parque Aconcagua pueden llegar a superar los 500 mm. Las precipitaciones ocurren principalmente durante el período invernal en forma de nieve y granizo, alcanzando en el promedio los 74,3 mm para la estación Puente de Inca y los 53,7 mm para la estación Punta de Vacas en el mes de junio (Figura 11) (Lisboa, 2011).

Estas condiciones junto con las temperaturas medias anuales más elevadas, determinan características de mayor aridez en la zona de Punta de Vacas (Méndez *et al.*, 2006).

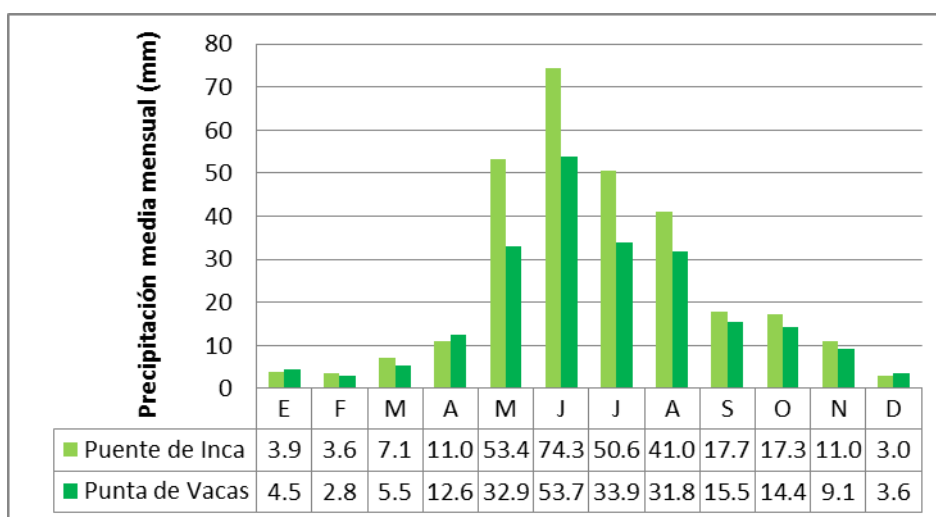


Figura 11: Precipitación media mensual (mm), de la estación Punta de Vacas (32° 52' 51" S y 69° 46' 06" O), en el período 1955-2005 y en la estación Puente de Inca (32° 49' 36" S y 69° 54' 39" O), en el período 1941-1976 (Lisboa, 2011).

Temperatura

En la estación Punta de Vacas (2.400 msnm.), la temperatura promedio en enero y julio está entre los 17,4 y 3,1°C respectivamente, para el período 1956-1997. En la estación Cristo Redentor (3.800 msnm.) las mismas se encuentran entre los 4 y -7 °C respectivamente, para el período 1941-1984. (Figura 12) (Lisboa, 2011).

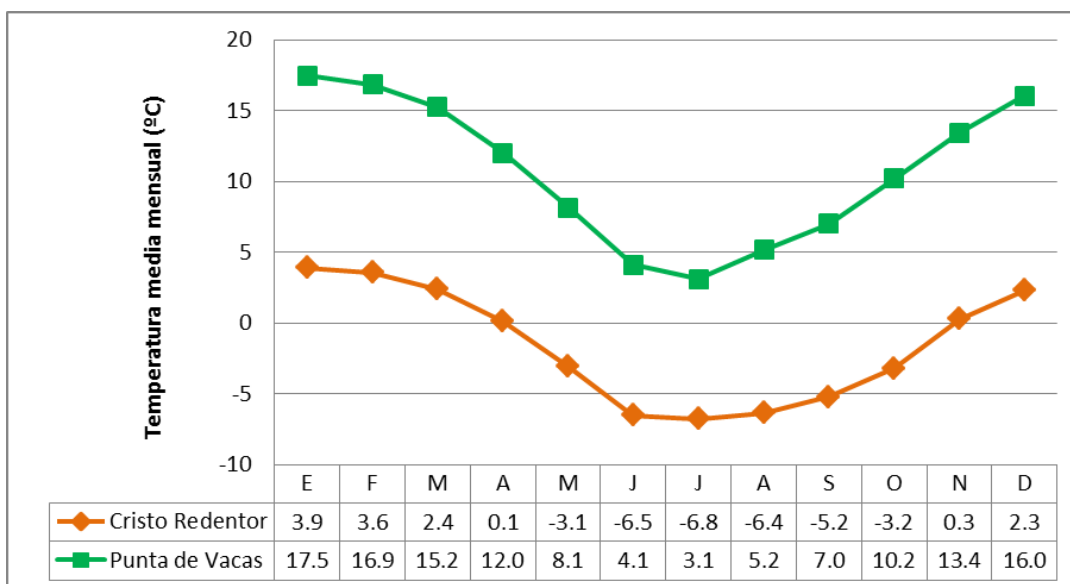


Figura 12: Temperatura media mensual (°C), estación Punta de Vacas (32° 52' 51" S y 69° 46' 06" O), en el período 1956-1997 y estación Cristo Redentor (32° 49' S - 70° 4' O), en el período 1941-1984 (Lisboa, 2011).

Vientos

Los vientos predominantes tienen dirección suroeste (579‰) y oeste (209‰). A corta distancia pueden notarse algunas variantes, conforme con la disposición del relieve. Son muy violentos y la velocidad media es de 30 km/h aunque superan los 80 km/h durante los temporales (Capitanelli, 1972).

En el valle principal del río Cuevas corre de O a E y en las quebradas subsidiarias de N a S. Por efecto orográfico se producen corrientes convectivas que ascienden y descienden por los valles. El viento en altura es fuerte y con dirección cambiante adquiriendo gran velocidad en los valles encajonados (Méndez *et al.*, 2006).

La frecuencia de los vientos Foehn juega un importante papel en las condiciones generales de la zona. Estos vientos son los que descargan la nieve en las altas cumbres y descienden por los valles como corrientes secas y cálidas normalmente con una muy baja humedad relativa que, en casos extremos, puede llegar a ser nula (Méndez *et al.* 2006).

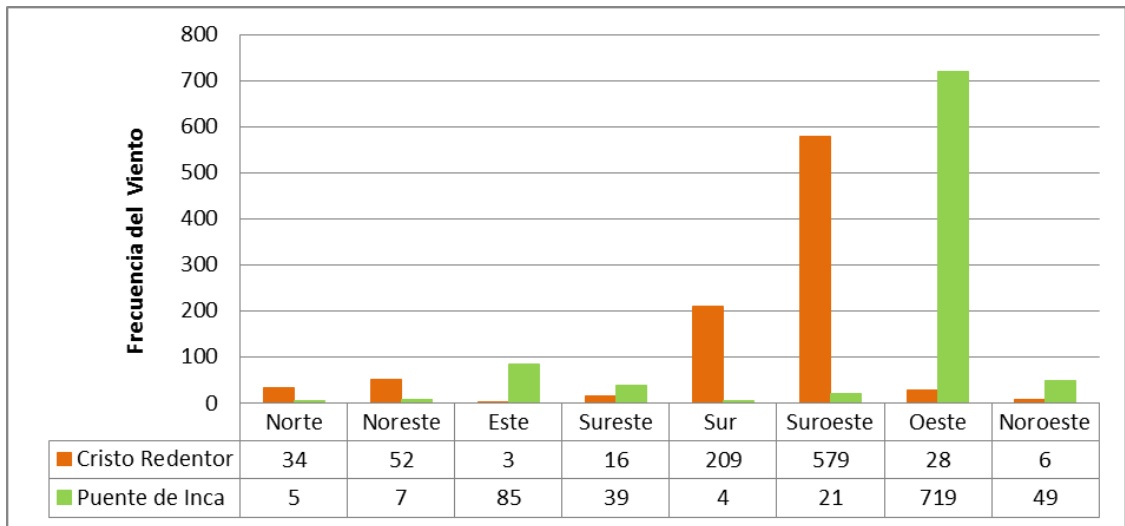


Figura 13: Frecuencia de los vientos en escala de 1000 registrada en la estación Cristo Redentor (32° 49' S - 70° 4' O), en el período 1941-1960 y en la estación Puente de Inca (32°49'S; 69°54' O) en el período 1941-1960 (Lisboa, 2011).

En el gráfico se observa que para la estación Cristo Redentor (3.800 msnm.), en el periodo 1941-1960, los vientos registrados son predominantes del SO y S. En la estación Puente del Inca (2.700 msnm.), en el periodo 1941-1960, los vientos predominantes son del O y con menos frecuencia del NO, SO, E y SE.

5.10. Hidrología

El área del Parque Aconcagua abarca dos cuencas principales, la cuenca del Río de Las Vacas y la cuenca del Río Horcones.

La cuenca del Río de Las Vacas confluye con el Río de Las Cuevas dando origen, junto al Río Tupungato, al Río Mendoza. La cuenca del Río Horcones, confluye aguas abajo con el Río de Las Cuevas.

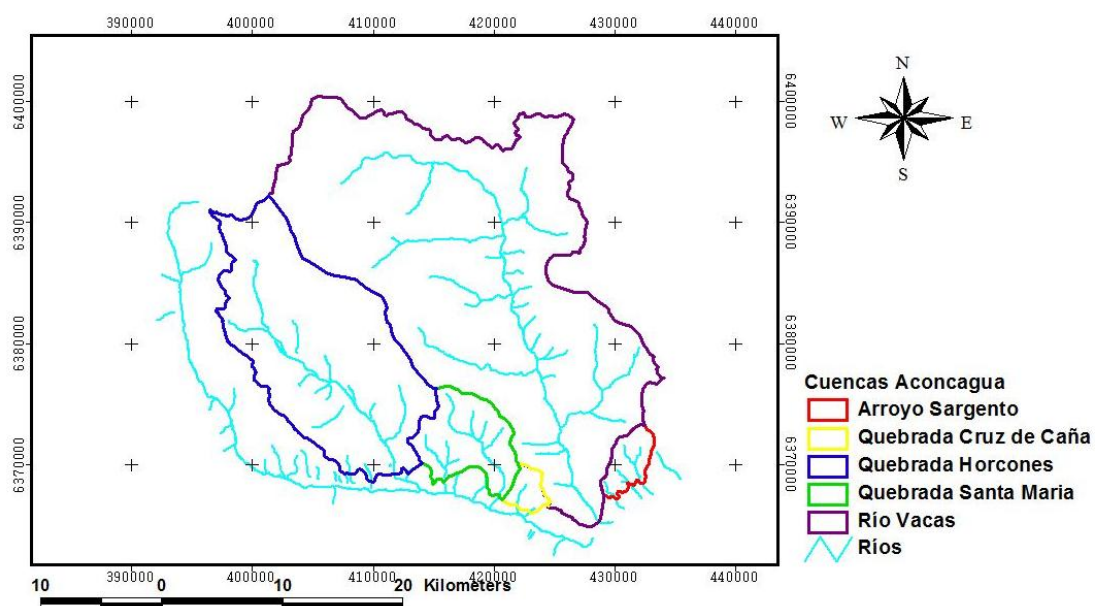


Figura 14: Cuencas y ríos del Parque Provincial Aconcagua.

El caudal promedio del Río de Las Cuevas es de 13,14 m³/s en enero y 3,23 m³/s en julio y el del Río de Las Vacas es de 8,21 m³/s y 1,98 m³/s respectivamente (Fig.14) ([Secretaría de Recursos Hídricos de la Nación, 2004](#)). Durante los meses estivales, los cursos de estos ríos incrementan su caudal debido a la fusión de nieve y glaciares (cubiertos o descubiertos).

En la zona están presentes masas glaciarias de gran importancia como lo son glaciares Horcones Superior y el Cuerno en las nacientes de la quebrada de Horcones y los glaciares de los Polacos, Güssfeldt, Vacas, Ameghino y Relincho en las nacientes del Río de las Vacas.

5.11. Geología Regional

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. El complejo volcánico Aconcagua de edad terciaria aflora también en la región y las vulcanitas permotriásicas del Grupo Choyoi. Estructuralmente la región pertenece a la faja plegada y corrida del Aconcagua con una serie de imbricamientos vergentes al oriente ([Ramos, 1996](#)).

En la quebrada del Río de las Vacas aflora la Formación Alto Tupungato de edad Carbonífero, el Grupo Choyoi de edad Permo-triásica, el periodo Jurásico esta representado por la Formación Auquilco y el Terciario por la Formación Santa María.

En la quebrada del Río Horcones se destaca la Formación Traquitas Puente de Inca representando al Triásico, el Jurásico se encuentra representado por las formaciones Auquilco, Tordillo, Paramillo de las Vacas y Vaca Muerta, mientras que el periodo Cretácico por las formaciones Diamante y Agrio ([Moreiras, 2007](#)).

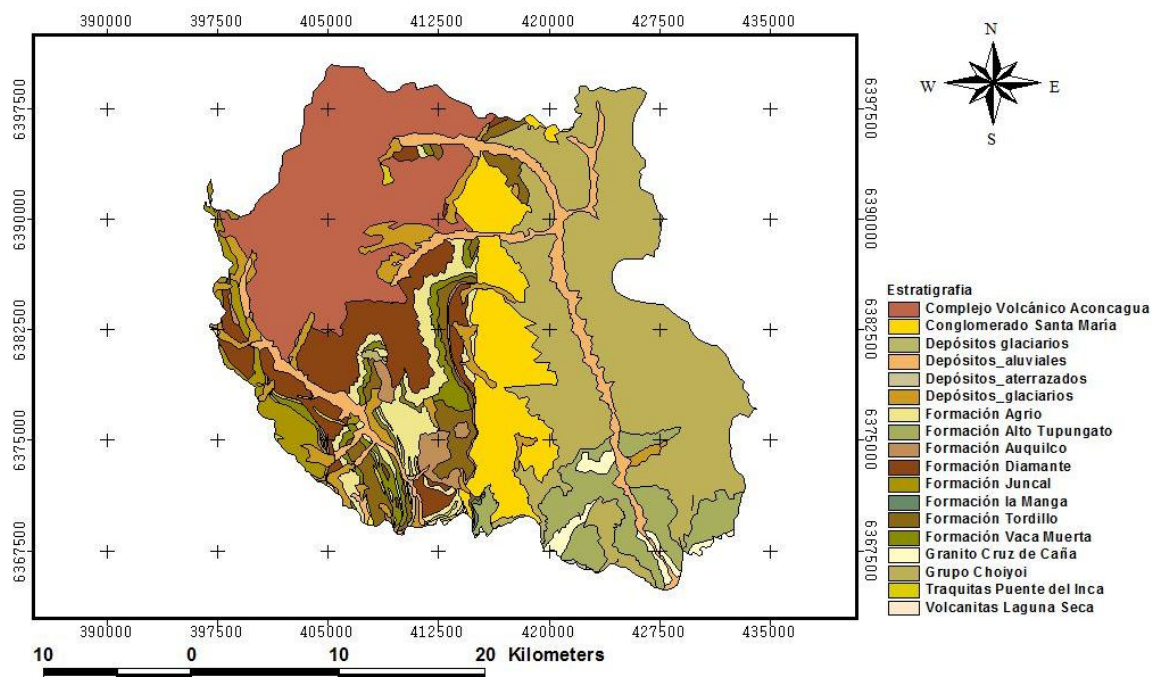


Figura 15: Mapa geológico del Parque Provincial Aconcagua. Digitalizado a partir de Moreiras, 2011.

5.12. Recursos geomorfológicos

Estas montañas se componen de cimas y vertientes más o menos escarpadas y de muy fuertes pendientes con valles en U, resultados de las glaciaciones. Es común observar diferentes geoformas originadas por procesos geocriogénicos (Méndez *et al.*, 2006). Randis (2012) elaboró un mapa inventario donde se identifican los diversos procesos o geoformas que se desarrollan en el Parque Aconcagua (Figura 16).

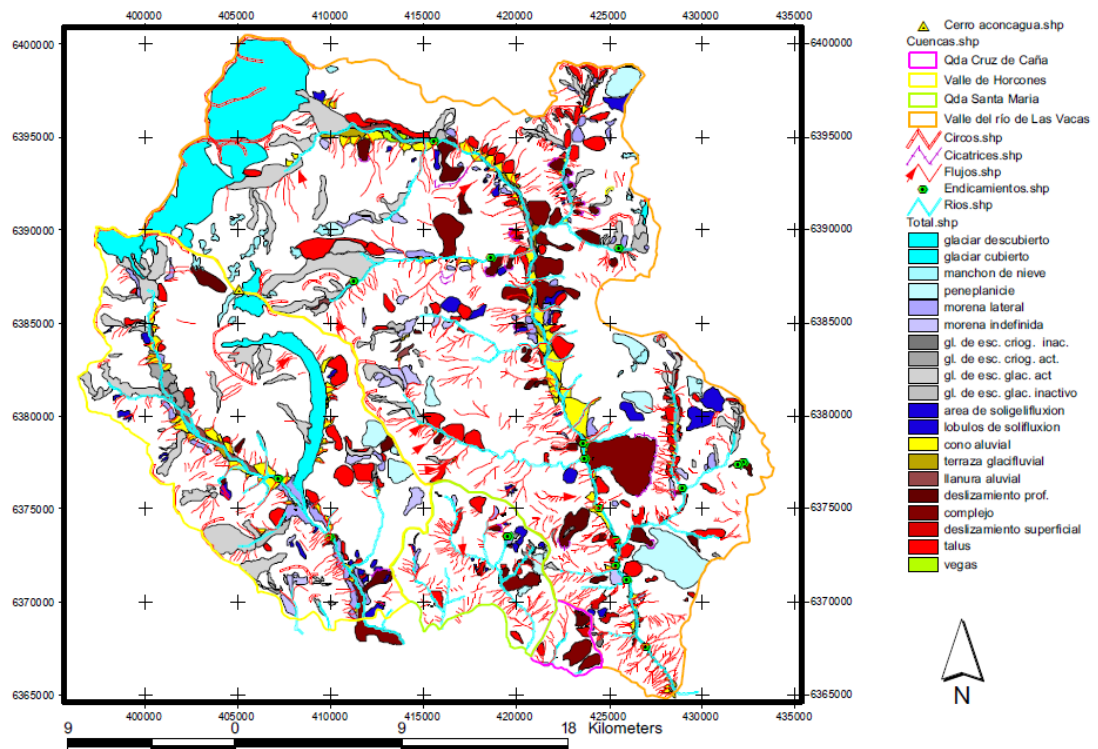


Figura 16: Mapa geomorfológico del Parque Provincial Aconcagua. (Celestes y violetas: ambiente glacial, grises y azules: ambiente periglacial, amarillo: ambiente aluvial, marrones: ambiente fluvial, rojos: procesos de remoción en masa y verde: vegas).

Fuente: Randis (2012).

En el ambiente glacial son frecuentes los depósitos morénicos glaciares, los cuerpos glaciares descubiertos y los manchones de nieve. En el ambiente periglacial los elementos que se presentan en mayor desarrollo son los glaciares de escombros, característicos de los Andes áridos. Los suelos congelados estructurados alcanzan un gran desarrollo. Los procesos post-glaciares han involucrado el transporte aluvial de grandes masas de material (Randis, 2012) generándose conos aluviales de alta pendiente con sectores más activos y otros inactivos.

A su vez, se observan depósitos de procesos de remoción en masa correspondientes a deslizamientos profundos y superficiales, y procesos complejos. Las caídas de bloques o detritos alcanzan una gran extensión dentro del área de la reserva. Se identifican endicamientos, generalmente pre-históricos, producidos por el arribo repentino de grandes cantidades de material arrastrado por los procesos de remoción en masa (Randis, 2012).

5.13. Sismicidad

A la latitud del área de estudio, el segmento de subducción subhorizontal de la placa de Nazca está relacionada con una notable actividad neotectónica (Bastías *et al.*, 1993; Ramos, 1993). La región está caracterizada por una intensa sismicidad (Costa *et al.*, 2000) donde al menos una docena de sismos $M_s > 7$ han tenido lugar en el Siglo XX (Moreiras, 2004a; Perucca y Moreiras, 2010) (Figura 17).

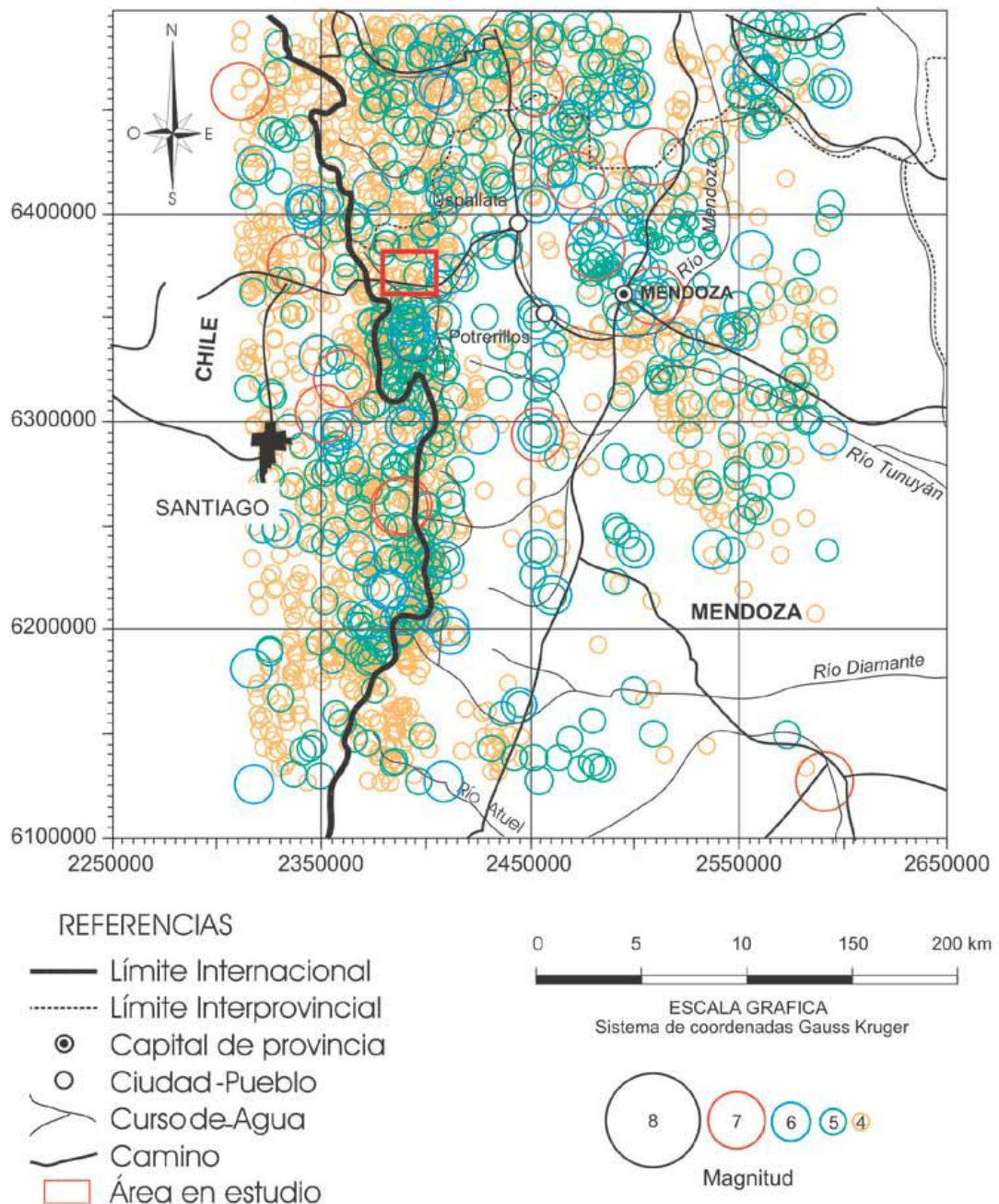


Figura 17: Mapa de frecuencia e intensidad sísmica de la provincia de Mendoza (Moreiras, 2004b).

5.14. Topografía

El modelado del paisaje en este sector de los Andes Centrales se debe principalmente a la acción de las grandes glaciaciones desarrolladas durante el Pleistoceno (Espizúa, 1993).

Las elevaciones dentro del Parque van desde los 1.700 hasta los 6.900 msnm. El 91% del área de estudio abarca alturas mayores a 3.000 msnm., y el 44,5% se encuentra entre los 3.000 y 4.000 msnm. El 61% de la superficie de la Cuenca del Río Horcones se encuentra entre los 4.000 y 5.000 msnm. y el 70% de la misma abarca alturas mayores a los 4.000 msnm. La Cuenca del Río Vacas presenta algunas diferencias, en ella las áreas que abarcan estas

alturas se reducen al 50 y 56% respectivamente (Figura 18). La Cuenca del Río Horcones es la que presenta mayor cantidad de superficie afectada por alturas mayores a los 4.000 msnm, lo cual podría indicar mayor inestabilidad de laderas de acuerdo a sus mayores alturas y condiciones climáticas (Lisboa, 2011).

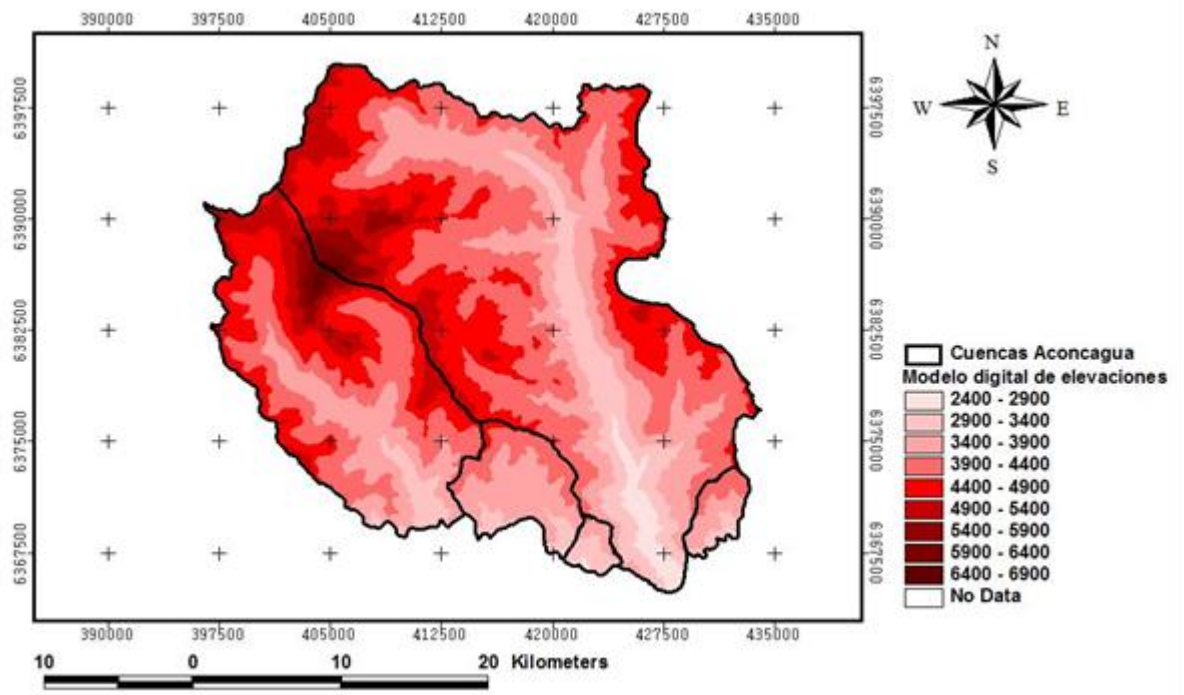


Figura 18: Modelo digital de elevaciones (msnm.) del Parque Provincial Aconcagua.

Fuente: ASTER GDEM (<http://wist.echo.nasa.gov>.)

En cuanto a las pendientes, el 80% del área de estudio presenta pendientes superiores a 16°. Las pendientes más dominantes son las que van desde los 16° a 35°. En la Cuenca del Río Vacas se observan pendientes máximas de 78° y medias de 25°. En la Cuenca del Río Horcones se observan pendientes máximas de 80° y medias de 28° (Figura 19).

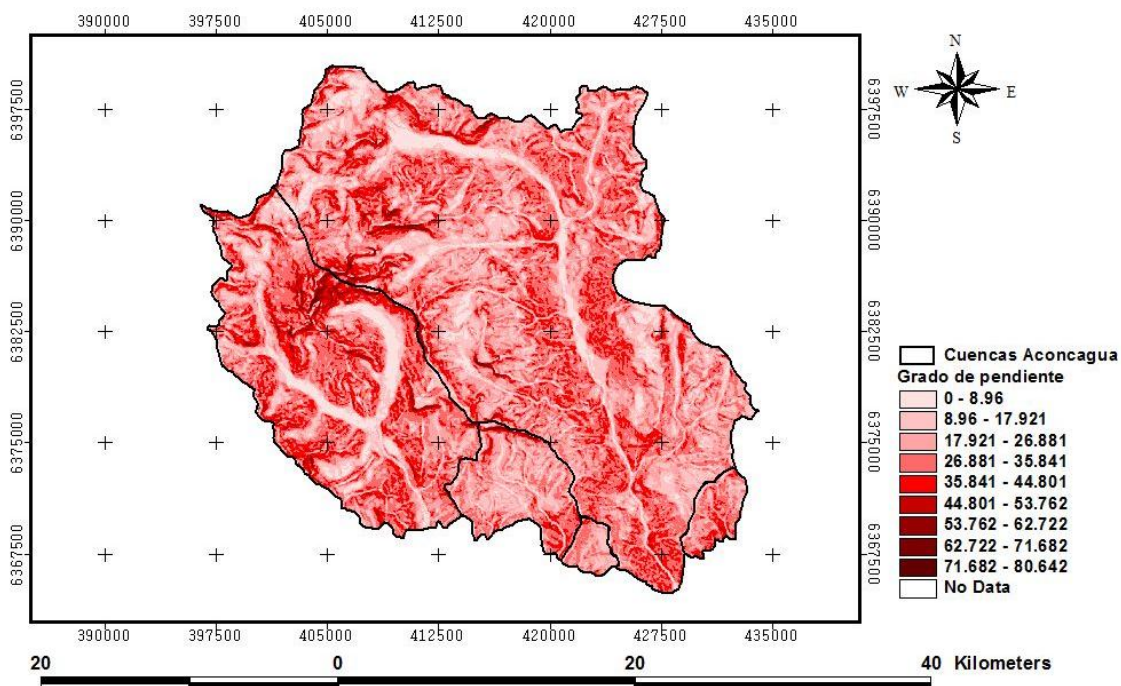


Figura 19: Mapa de Pendientes obtenido a partir del Modelo Digital de Elevaciones

En cuanto a las orientaciones (Figura 20) se observa que las predominantes son las O y SE representadas en un 16,3% y 16,1% de la superficie respectivamente. Las menos predominantes son las N con un 6,2% de la superficie y las NE con un 4,8% de la superficie analizada (Figura 20).

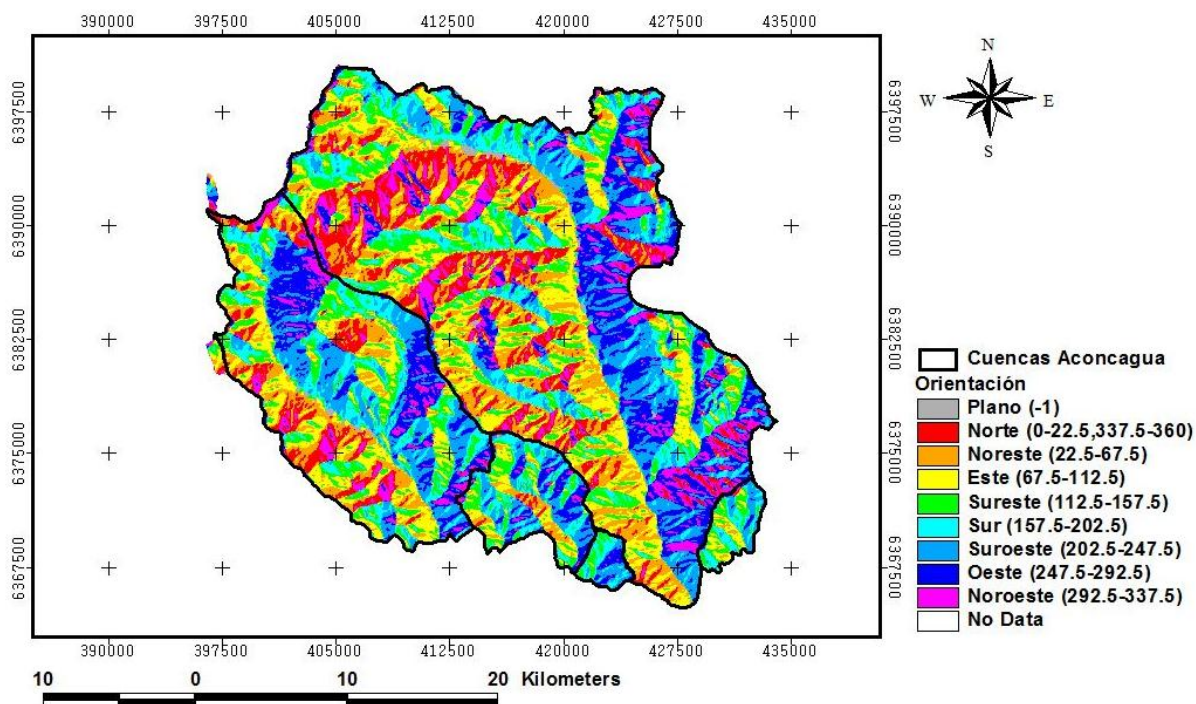


Figura 20: Mapa de Orientaciones obtenido a partir del Modelo Digital de Elevaciones.

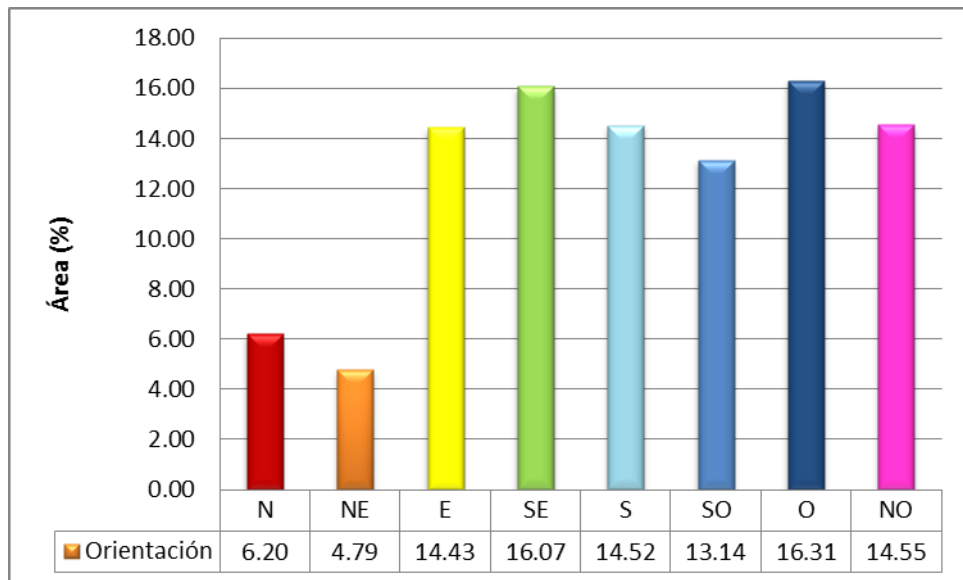


Figura 21: Superficie (%) por orientación de las laderas.

5.15. Suelos

En los afloramientos rocosos no se observa generación de suelos. En depósitos cuaternarios como deslizamientos o terrazas aluviales el desarrollo de los suelos es muy escaso (Entisoles, Inceptisoles y probablemente Gelisoles). Son pedregosos, con algunos suelos mejor desarrollados en los pisos de los valles (Molisoles). Se reconocen horizontes B_t y B_k donde el horizonte A superior ha sido generalmente erosionado (Lisboa, 2011).

En las vegas o mallines los suelos son de textura más fina con altos contenidos de materia orgánica y de baja permeabilidad. Existen suelos salinos en los bordes de las lagunas con agua temporaria. Los suelos están condicionados a los procesos de crioturbación y se mantienen congelados gran parte del año. Existen suelos eólicos como resultado de deposiciones en sitios morénicos afectados por el viento. Los abundantes afloramientos rocosos, frecuentemente crioclastados y con grietas, dan origen por meteorización a los materiales originarios de los suelos de la región (Méndez, 2006).

6. Metodología

Las etapas del trabajo llevadas a cabo para realizar el análisis, comparar los modelos y obtener los distintos mapas de susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos se representa en el siguiente diagrama.

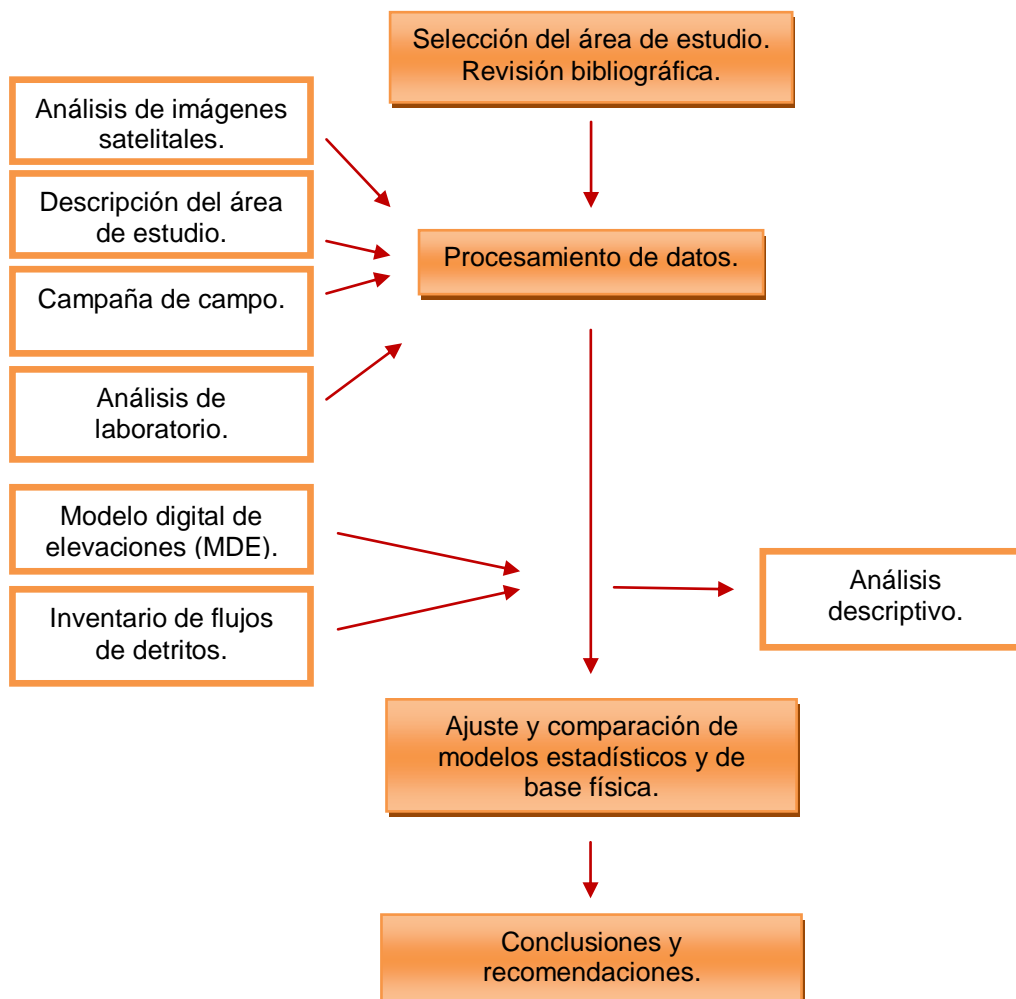


Figura 22: Diagrama resumen de la metodología seguida en el presente estudio.

6.1. Análisis de imágenes satelitales

Con el fin de identificar la distribución espacial de los flujos de detritos y seleccionar puntos representativos para muestreo y observación en campo, se realizó un análisis de imágenes satelitales obtenidas en el programa Google Earth.

6.2. Descripción del área de estudio y revisión bibliográfica

Varios aspectos del medio físico fueron abordados con el objetivo de caracterizar el ambiente donde se desarrollan los flujos de detritos. Se buscaron antecedentes en trabajos realizados en el área del Parque Provincia Aconcagua. Fundamentos teóricos sobre movimientos en masa, y en especial sobre flujos de detritos, y modelos geoambientales fueron investigados a partir de la bibliografía existente en la temática.

6.3. Campañas de campo

Se realizaron dos campañas de campo en el Valle Horcones, las mismas se llevaron a cabo el mes de marzo de 2011. El objetivo de las salidas fue realizar observaciones en el terreno de los eventos más representativos en cuanto a su magnitud identificados previamente en imágenes satelitales (Figura 23). Durante las mismas se tomaron muestras de depósitos de los flujos de detritos para realizar una caracterización inicial.

Las zonas de muestreo se presentan en la siguiente tabla con su respectiva ubicación.

Tabla 5: Sitios de muestreo, coordenadas de los puntos, descripción de la ubicación.

Sitios de muestreo	Coordenadas (m)		Ubicación
	Sistema de referencia WGS 84 y de proyección UTM		
	Latitud	Longitud	
Los Grises	410121	6374540	En el sitio "Los blancos", antes del campamento Confluencia, en la ladera oriental del valle.
Horcones inferior	410062	6379494	En el camino hacia plaza Francia, en la ladera oriental del valle.
Los Colorados	409978	6380856	En el camino hacia plaza Francia, en la ladera oriental del valle.
La Vega	406822	6376899	Saliendo desde el campamento Confluencia por el camino hacia Plaza de mulas. En la ladera oriental del valle.
Quebrada Sargento Mas	403741	6378838	Camino hacia plaza de Mulas. En la ladera oriental del valle.



Figura 23: Puntos de muestreo en campo. Fuente: Google Earth.

En cada sitio se tomaron las coordenadas del punto con GPS (Garmin® Etrex Vista HCX) a fin de establecer su ubicación geográfica, la pendiente media de la cuenca de cada flujo mediante el empleo de un clinómetro y la cobertura vegetal mediante una observación visual simple. Además se midió en el cauce del flujo el número de capas de depósitos correspondientes a distintos episodios, espesor de cada capa, relación matriz-bloque y el diámetro del clasto mayor. Se extrajeron muestras del material depositado por el agua en las distintas capas y además se creó un registro fotográfico de los perfiles y de la zona en general.

6.4. Análisis de muestras en el laboratorio

El análisis de las muestras extraídas durante el muestreo en campo fue realizado en la Facultad de Ciencias Agrarias, en el Laboratorio de Edafología.

En un principio se prepararon las muestras mediante molido por presión suave y tamizado empleando un tamiz de 2 mm. (Nº 10). Con esto se logra separar los fragmentos gruesos mayores a los 2 mm. de diámetro.

Se realizaron los siguientes análisis en la matriz de los depósitos de flujos de detritos:

- Conductividad hidráulica saturada: método de “permeámetro de carga constante o del cilindro con suelo disturbado” (Kutílek et al., 1994).
- Materia orgánica oxidable: método *Walkley-Smolik*. (Walkley et al., 1934).
- Textura: Análisis granulométrico: para la fracción menor a 50 µm se aplicó el método hidrométrico de Bouyoucos (1962) con dispersión del cual se obtuvieron las fracciones granulométricas elementales entre 50 y 2 µm (limo americano), entre 20 y 2 µm (limo internacional), y menor a 2 µm (arcilla); y para la fracción arena americana se realizó un tamizado con tamices ASTM Nº 10, Nº 18, Nº 35, Nº 60, Nº 140, y Nº 270 que corresponden a diámetros de partícula de 2000 µm, 1000 µm, 500 µm, 250 µm, 105 µm, y 53 µm, respectivamente. Para esta operación se utilizó una tamizadora eléctrica marca Zonytest. Cada una de las fracciones obtenidas se pesó en balanza analítica con precisión a la centésima de gramo. Con los datos granulométricos se realizaron las curvas de composición granulométrica, y se clasificaron los suelos.

6.5. Mapa inventario de flujos de detritos

Es un instrumento clave para el entendimiento de la amenaza y para calibrar los resultados de la zonificación de la susceptibilidad (Suarez, 2009). En el presente trabajo se revisó y utilizó el mapa inventario de flujos de detritos elaborado por Moreiras, (2008) y completado posteriormente por Randis, (2012). El mismo fue digitalizado en la imagen ALOS georreferenciada, con formato GeoTIFF. Su resolución espacial es de 10 metros y tiene un nivel de procesamiento de falso color compuesto. Los flujos digitalizados como líneas que siguen sus trayectorias en este mapa, se llevaron a puntos marcando las zonas de iniciación de los mismos. Esto fue realizado debido a que la presente investigación se limita a desarrollar modelos de predicción de flujos de detritos en las áreas de inicio dejando de lado el trayecto de

los fenómenos. La tarea de predicción de las trayectorias requiere la recolección de datos específicos del sitio que generalmente no están disponibles en grandes superficies y además, se excederían los límites temporales del presente trabajo de tesis. Por lo tanto, es importante destacar que los resultados no nos dicen si una zona es susceptible a ser atravesada por la trayectoria de un flujo.

En este análisis no se diferencian los tipos de flujos, es decir que no se clasifican en función de la proporción y tamaño de las partículas y en función de las proporciones de sedimento-agua, sino que se considera a todos los eventos como flujos de detritos en general. Tampoco se analiza la actividad de los mismos.

El mapa inventario está expresado en una escala de (1:250.000). Incluye un total de 923 flujos de detritos, distribuidos en 5 cuencas: Quebrada Horcones, Río Vacas, Quebrada Santa María, Quebrada Cruz de Caña y Arroyo Sargento. La densidad de flujos de detritos para toda el área es de 1,06 flujos/km².

Del total de flujos se escogieron aleatoriamente 766 (83%) eventos que fueron empleados en la ejecución de los distintos modelos y los restantes 157 (17%) eventos constituyen un mapa inventario de control que se utilizaron en la validación de los mismos.

6.6. Modelo Digital de Elevaciones (MDE)

Se descargó una imagen radar del satélite ASTER GDEM del sitio <http://wist.echo.nasa.gov>. Las especificaciones técnicas son las siguientes: formato GeoTIFF con coordenadas geográficas UTM y un arcosegundo (30 m de resolución espacial). Este modelo digital de elevaciones (DEM) está referenciado en el geoide WGS 84/EGM 96.

A partir del procesamiento de este mapa se derivaron los otros datos topográficos necesarios para el análisis, como pendientes y orientaciones.

6.7. Programas empleados para el análisis

El procesamiento de la información geográfica fue realizado mediante el empleo de Arc View 3X, utilizándose los módulos: Spatial Analyst, Geoprocessing, X-Tools, Grid-Tools, SINMAP; y de gvSIG 1.12. Para el análisis estadístico se utilizó el programa Infostat Profesional (Di Rienzo *et al.*, 2012).

6.8. Análisis descriptivo

Mediante la extensión X-Tools de ArcView se calculó la superficie de cada una de las cuencas. Las alturas máximas, mínimas y medias por cuenca se derivan del MDE.

A partir del MDE se derivaron los mapas de pendientes y orientaciones. Se obtuvieron los valores máximos, mínimos y medios de pendientes.

Posteriormente, a partir de la superposición del mapa inventario de flujos de detritos con el de cuencas, mediante la extensión Geoprocessing, se obtuvo el número de eventos inventariados por cuenca.

A su vez se calcularon las medidas de posición y tendencia central de altura, pendiente y orientación para los flujos de detritos inventariados en la zona del Parque Provincial Aconcagua con sus respectivas distribuciones de frecuencias representadas en un histograma.

6.9. Análisis de susceptibilidad

Para la determinación de la susceptibilidad a la ocurrencia de flujos en el Parque Aconcagua se evaluaron y combinaron factores de susceptibilidad comparado con el mapa inventario. Como se mencionó anteriormente, en la elaboración y aplicación de los distintos modelos se utilizaron los 766 flujos escogidos aleatoriamente y los restantes 157 flujos fueron empleados en la validación de dichos modelos. Posteriormente se compararon los resultados obtenidos.

Es importante destacar que en este análisis no se incluyen aspectos de la geotecnia descriptiva de los flujos de detritos. Además, es pertinente recordar que se tienen en cuenta las zonas de iniciación y no las trayectorias de los flujos, por lo tanto cuando hablamos de flujos de detritos, estamos haciendo referencia a las zonas de iniciación de dichos eventos.

El análisis de susceptibilidad incluye la aplicación de tres modelos:

- a) Modelo W_i de van Westen
- b) Modelo de regresión logística
- c) Modelo SINMAP

6.9.1. Modelos estadísticos

Este análisis se basa en la relación observada entre cada factor y la distribución de los flujos de detritos. De esta manera la evaluación de la susceptibilidad se vuelve más objetiva por el hecho de que los factores de inestabilidad y sus interrelaciones son evaluados con base estadística. En total se contemplaron cinco factores en forma de capas temáticas que integran el modelo para zonificar la susceptibilidad, estos son: litología, pendiente, orientación, vegetación y altura. Se aplicaron dos modelos estadísticos para la evaluación de la susceptibilidad del terreno a la ocurrencia de flujos de detritos, el ***Índice Estadístico W_i*** y la ***Regresión Logística***.

A continuación se detallan las variables temáticas seleccionadas para el análisis de susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos. En la Tabla N°6 se presenta, a modo de resumen, cada variable, su definición, rango y unidades.

Tabla 6. Variables temáticas, su definición, rango y unidades.

Variable condicionante	Definición	Rango (mín.-máx.), unidades
Litología	Tipo de rocas	categorico
Pendiente	Desnivel por distancia	0 a 80,64 [grados]
Orientación	Orientación de las laderas respecto al N	-1 a 359 [grados]
Altura (MDE)	Elevación respecto del nivel del mar	2.400-6.900 [msnm]
Vegetación	Cobertura vegetal	Categorico binario

6.9.1.1. Statistical index (Wi) method de Van Westen (1997)

6.9.1.1.1. Evaluación de factores: normalización

Se analizó la relación entre la distribución de los flujos de detritos y los distintos factores condicionantes. En una primera etapa se obtiene la densidad de flujos (Nº de flujos/km²) para cada clase de factor y posteriormente se procede a una normalización estadística utilizando el valor de la densidad para todo el mapa, con el fin de evitar los sesgos producto de las diferencias de área entre una clase y otra. De esta manera se obtuvieron los pesos asignados a cada clase de la variable correspondiente.

$$Sf = F^1 / F^2 \quad (15)$$

Donde:

F1= Densidad de flujos para cada clase = Nº de flujos para cada clase/ Área de cada clase

F2= Densidad de flujos para el área de estudio = Nº de flujos totales/ Área total analizada.

Los factores analizados fueron:

Litología: se digitalizó el mapa de litología para el área de estudio a partir del mapa realizado por [Moreiras \(2011\)](#).

Pendiente: se reclasificó en 6 categorías de acuerdo a las la clasificación de pendientes establecida por [van Zuidam \(1986\)](#) (citado en [Mora R., 2004](#)) tal como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7: Clases de pendientes, condiciones del terreno, colores sugeridos y valoración del parámetro Sp. por van Zuidam (1986) citado en Mora (2004).

Clase de pendiente (Grados)	Condiciones del terreno	Color sugerido
0-2	Planicie, sin denudación apreciable	Verde oscuro
2-4	Pendiente muy baja, peligro de erosión	Verde claro
4-8	Pendiente baja, peligro severo de erosión	Amarillo
8-16	Pendiente moderada, deslizamientos ocasionales, peligro severo de erosión	Naranja
16-35	Pendiente fuerte, procesos denudacionales intensos (deslizamientos), peligro extremo de erosión de suelos.	Rojo claro
35-55	Pendiente muy fuerte, afloramientos rocosos, procesos denudacionales intensos	Rojo oscuro
>55	Pendiente extremadamente fuerte, afloramientos rocosos, procesos denudacionales severos (caída de rocas), cobertura vegetal limitada.	Morado

Orientación

Este factor valora la influencia de la orientación de las laderas en la formación de flujos de detritos. Es un factor incidente en la inestabilidad de las pendientes porque está relacionada a mayor o menor insolación o radiación solar tal que condiciona la preservación de la nieve o favorece su descongelamiento saturando de esta manera los materiales de las laderas (Moreiras, 2009).

Altura

En el área de estudio, las precipitaciones aumentan sensiblemente con la altura, por ende las mayores elevaciones deberían mostrar mayor susceptibilidad a la inestabilidad principalmente si la causa generadoras son lluvias intensas, sobrecarga por la caída de nieve copiosa o saturación del sustrato durante períodos cálidos de fusión (Moreiras, 2009).

La altura se reclasificó en 9 clases: a-: 2400-2900 msnm., b- 2900-3400 msnm, c- 3400-3900 msnm., d- 3900-4400 msnm, e- 4400-4900 msnm., f- 4900-5400 msnm., g- 5400-5900 msnm., h-5900-6400 e i- 6400-6900 msnm.

Vegetación

Se utilizó el mapa de vegetación elaborado por Zalazar (2007). En este caso no se tuvo en cuenta la distinción entre comunidades, sino que se dividió esta variable en dos categorías: presencia de vegetación y ausencia.

6.9.1.1.2. Cálculo del índice de susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos a partir del W_i de Van Westen

Una vez obtenido el valor normalizado (peso asignado) para cada categoría, se elaboraron mapas temáticos de cada factor, a los cuales se les aplicó el logaritmo natural. De esta manera se obtuvo el W_i de cada factor condicionante. Posteriormente se procedió a calcular el índice de susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos (ISFD) a partir de la aplicación del W_i de Van Westen (1997), acorde a la siguiente ecuación:

$$ISFD = Litología_w + Altura_w + Pendiente_w + Orientación_w + Vegetación_w \quad (16)$$

donde: $Litología_w$ es el coeficiente W_i de la variable Litología; $Altura_w$ es el coeficiente W_i de la variable altura; $Pendiente_w$ es el coeficiente W_i de la variable pendiente; $Orientación_w$ es el coeficiente W_i de la variable orientación y $Vegetación_w$ es el coeficiente W_i de la variable vegetación.

6.9.1.2. Análisis multivariado: Regresión Logística

El análisis previo permite conocer las clases de cada variable más susceptible a ser afectada por procesos de remoción en masa en función de los valores de densidad normalizada de cada clase. Sin embargo, no determina la importancia relativa de cada variable en la valoración de la susceptibilidad, desconociendo de esta manera el carácter predictivo de cada variable.

Se aplicó la regresión logística para describir la relación entre la presencia o ausencia de flujos de detritos y un conjunto de variables independientes como son la litología, la pendiente, la altura, la orientación y la presencia o ausencia de vegetación.

Para la aplicación de este método estadístico en un principio, se generó una base de datos con la información de alturas, pendientes, orientación, litología y vegetación para cada flujo de detrito inventariado (Anexos).

A partir de los 923 puntos de presencia de flujo de detritos, se generó un polígono de zonas de amortiguación de 500 m alrededor de cada punto. Se realizó un muestreo de puntos de ausencia de flujo, a partir de la generación de un vector de puntos de 766 puntos de distribución aleatoria en la zona de ausencia de flujos, es decir, en el área correspondiente al límite del parque y la zona de amortiguación de los puntos de presencia de flujo.

6.9.2. Ajuste del modelo de base física SINMAP

Se ajustó el modelo de base física SINMAP. Los datos de entrada son el mapa inventario de flujos de detritos (766 flujos) y la topografía del terreno (MDE). A partir del MDE el modelo deriva la pendiente y las áreas con potenciales condiciones de humedad (índice de humedad), estimadas a partir de las características topográficas que facilitan la convergencia del flujo de agua. Se utilizó una región de calibración única, es decir que los parámetros: fricción del suelo

(**phi**), 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. Esto es debido a que no existe información detallada respecto a la variabilidad de los parámetros en función de la litología, de propiedades mecánicas de los suelos presentes en el área, de balances hídricos, etc.

El procedimiento de aplicación del modelo fue en base al manual del usuario (**Pack, R.T., Tarboton, D.G., Goodwin, C.N.** SINMAP a stability index approach to terrain stability hazard mapping” SINMAP User’s Manual) disponible en:

http://www.fs.fed.us/informs/sinmap/sinmap_users_guide.pdf.

6.10. Validación de los resultados

Las predicciones obtenidas con los distintos modelos fueron analizadas comparativamente. Los mapas de susceptibilidad obtenidos fueron validados espacialmente mediante la superposición de dichos mapas con un mapa inventario de control. Éste mapa de control está constituido por la población de flujos de detritos identificados e inventariados que no han sido utilizados en el cálculo inicial de los mapas de susceptibilidad (157 flujos).

Se evaluó la predicción de los modelos de una manera comparativa y se analizaron ventajas y desventajas de los métodos aplicados. A su vez, se analizaron estos resultados con el trabajo de [Moreiras \(2008\)](#), quien describe flujos importantes y zonas de eflujos dentro del Parque Provincial Aconcagua.

6.11 Medidas preventivas

Las cartografías de susceptibilidad a los flujos de detritos obtenidas por los modelos de mejor ajuste se asociaron espacialmente con las zonas de distinta intensidad de uso del Parque Provincial Aconcagua, con el fin de estimar el riesgo hacia los usuarios debido a la ocurrencia de los procesos estudiados.

7. Resultados y discusión

7.1. Salida a campo

Las distintas capas de depósitos identificadas en los cauces de flujos corresponden a distintos eventos encauzados en un mismo sistema. Siendo la capa 1 la más superficial y la capa 3 la más profunda.

En todos los cauces de flujos se identificaron tres capas de depósitos correspondientes a distintos episodios de arrastre, es decir a distintos flujos de detritos. En general se observa a simple vista que en la mayoría de las capas hay mayor proporción de bloques que de matriz de sedimentos finos, excepto en el sitio “La Vega” que se observó en las dos primeras capas mayor proporción de material fino que de bloques de mayor tamaño. En general los sitios no presentan vegetación o la misma es muy escasa. En el sitio “Horcones Inferior” se observó que las dos capas superiores estaban muy compactadas.

En la tabla 8 se presentan los puntos de muestreo con las respectivas mediciones realizadas en el campo.

Tabla 8: Mediciones en cada sitio de muestreo.

Sitio	Pendiente	Cobertura vegetal (%)	Depósitos de flujos de detritos	Espesor (cm)	Relación (%)		Diámetro del clasto mayor (cm)
					Bloque	Matriz	
Los Grises	37°	-	C1	110	80	20	48
			C2	60	60	40	76
			C3	115	80	20	47
Horcones Inferior	22°	-	C1	30	40	60	19
			C2	43	40	60	14
			C3	33	60	40	8
Los Colorados	26°	-	C1	80	80	20	13
			C2	18	70	30	13
			C3	36	70	30	8
La Vega	16	25	C1	15	10	90	4.5
			C2	16	5	95	3.5
			C3	12	60	40	30
Sargento Mas	14	20	C1	19	90	10	19
			C2	11	95	5	11
			C3	12	95	5	11

Primer punto de muestreo: Los grises

Este paraje, también conocido como “Los blancos”, se encuentra en la quebrada del Río Horcones antes de llegar al campamento Confluencia (Figuras 25 y 26). Es uno de los sectores más activos en relación a los flujos de detritos, donde existen dos abanicos aluviales afectados por reiterados eventos. La recurrencia de estos es reportada como anual por los baquianos (Moreiras. 2008).



Figura 25: Punto de muestreo “Los Grises”. a) se observa el campamento Confluencia desde uno de los cauces del flujo. b) medición del perfil de uno de los cauces. c) vista frontal del abanico aluvial d) cauce del flujo. Fuente: a), c) y d): Autora; b): Ramón Olivera, Guardaparque del Parque Provincial Aconcagua.

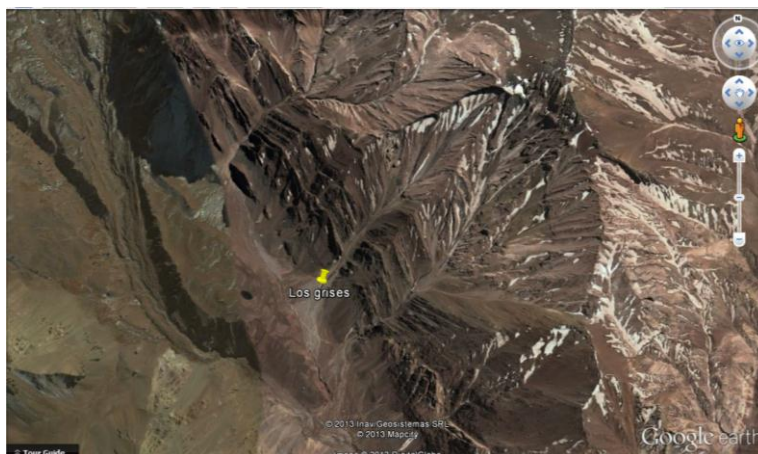


Figura 26: Imagen satelital de Google Earth mostrando punto de muestro “Los Grises”.

Segundo punto de muestreo: Horcones Inferior

Este paraje se encuentra aguas arriba del campamento Confluencia a unos tres kilómetros de la desembocadura del Horcones Inferior (Figuras 27 y 28). En el sitio se desarrollan conos aluviales que han obstruido parcialmente el rio Horcones Inferior. En este sector existen canales activos en donde se han manifestado reiterados flujos de detritos ([Moreiras. 2008](#)).



Figura 27: Punto de muestreo “Horcones inferior”. a) y b) cauces del flujo. c) medición de perfil de uno de los cauces. d) albardones de un cauce del flujo. Fuente: Autora.

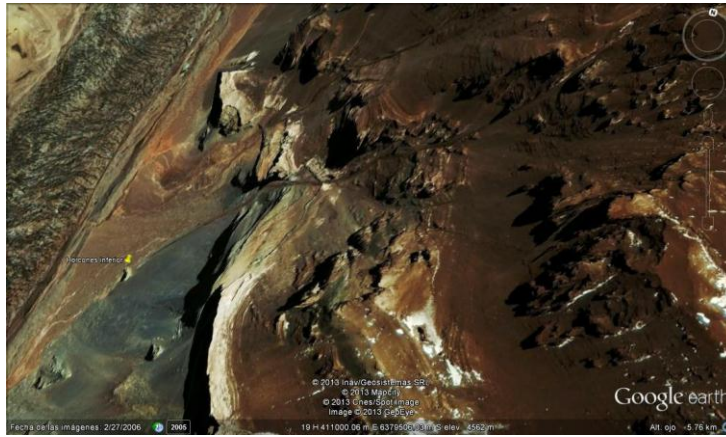


Figura 28: Imagen satelital de Google Earth indicando punto de muestreo “Horcones Inferior”

Tercer punto de muestreo: Los Colorados

Este sitio se encuentra en la quebrada del Horcones inferior, unos kilómetros antes de la llegada al campamento de Plaza Francia (Figuras 29 y 30).

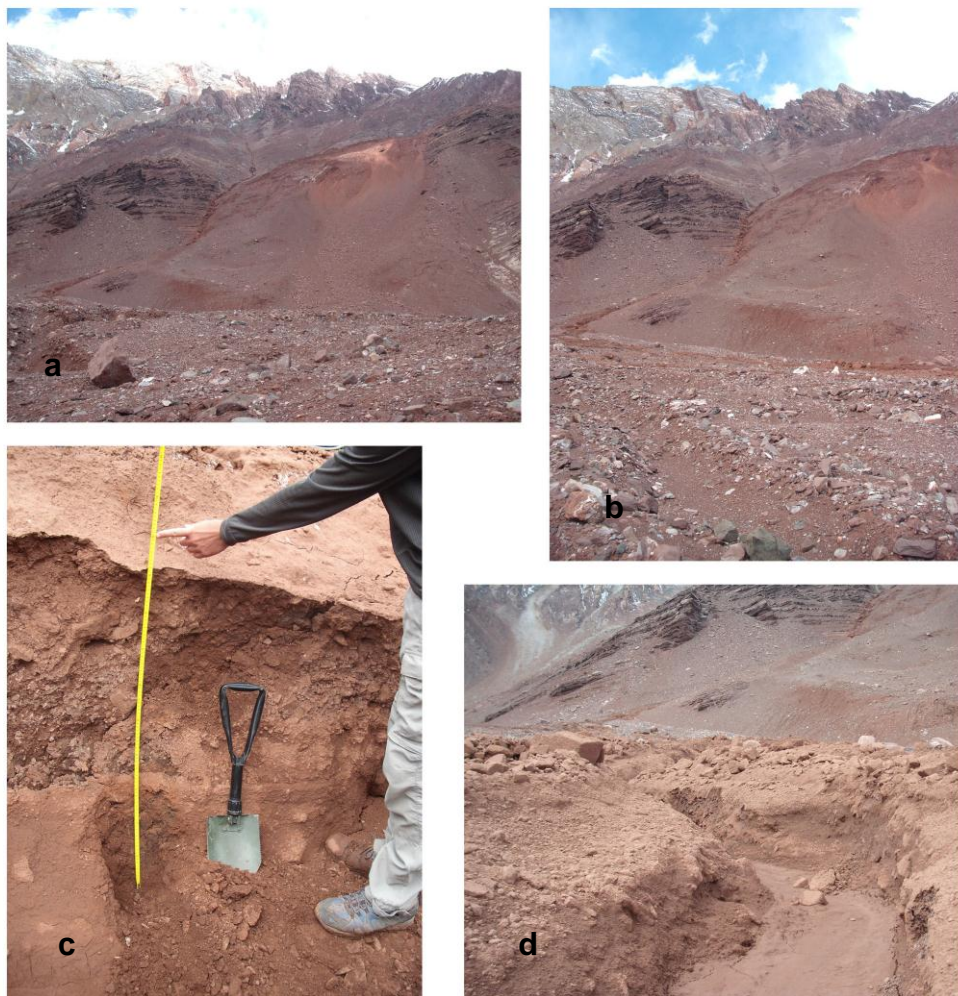


Figura 29: Punto de muestreo “Los colorados”. a) b) d) Cauces del flujo c) medición de perfil de uno de los cauces. Fuente: Autora.

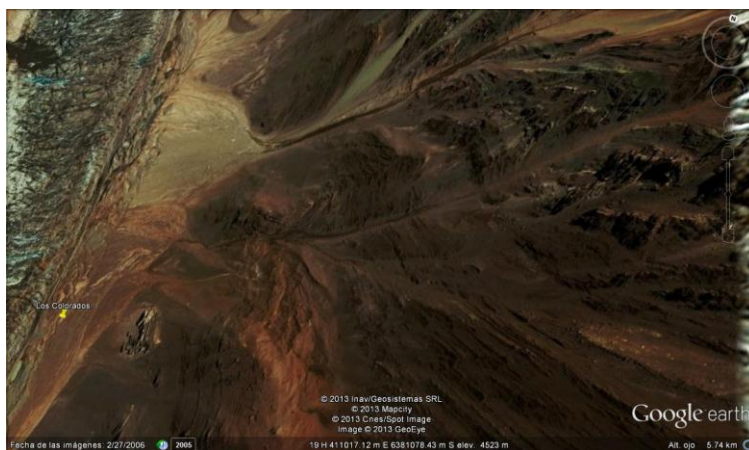


Figura 30: Imagen satelital de Google Earth indicando el punto de muestro “Los Colorados”.

Cuarto punto de muestreo: La vega

Unos kilómetros aguas arriba del campamento Confluencia, por la quebrada del río Horcones Superior, se encuentra este sitio en donde se han desarrollado flujos que dañan las superficies de las vegas (Figuras 31 y 32).

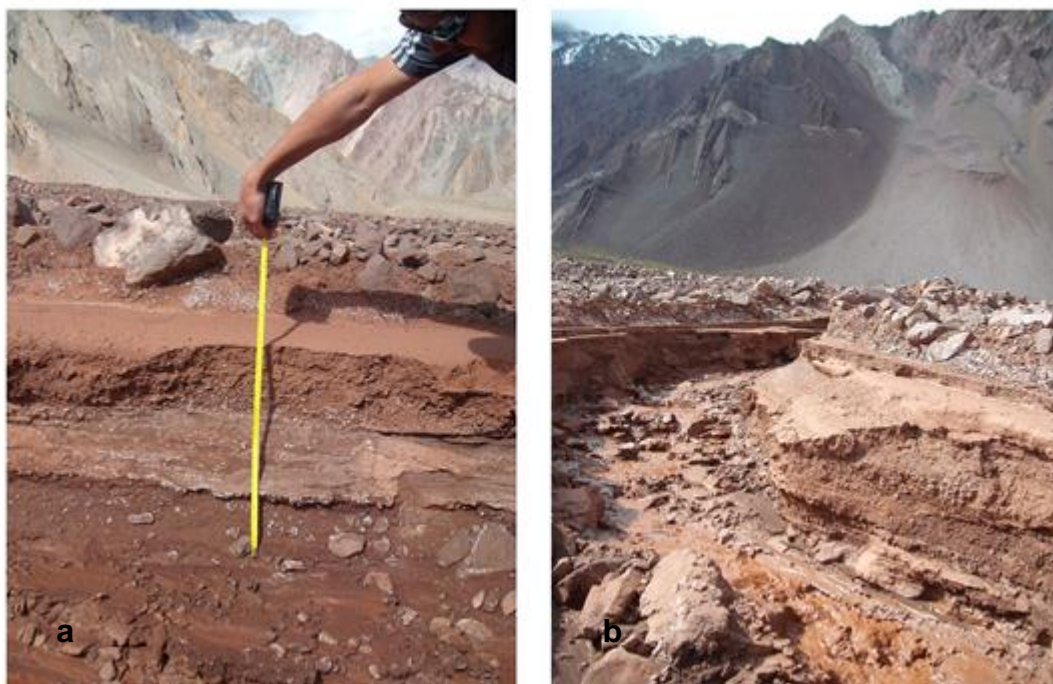


Figura 31: Punto de muestreo “La vega”. a) medición de perfil de uno de los cauces. b) cauce de flujo con arrastre de material. Fuente: Autora.

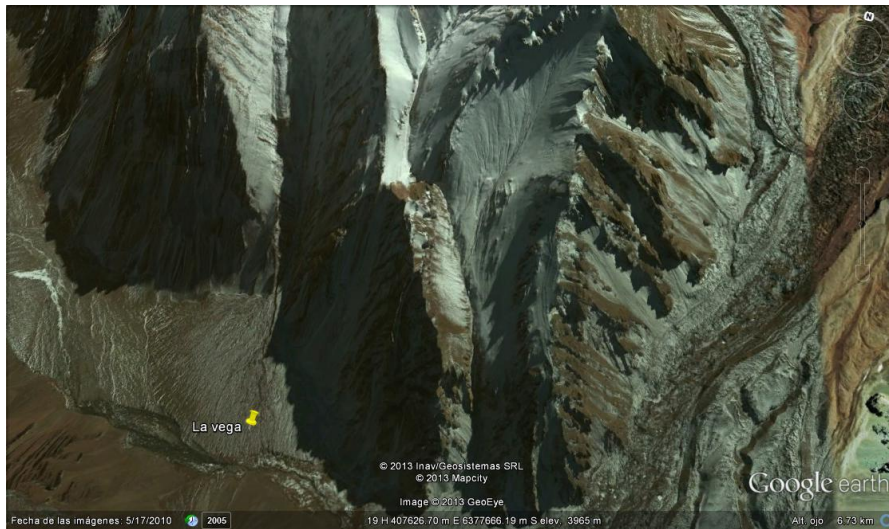


Figura 32: Imagen satelital de Google Earth indicando el punto de muestro “La Vega”.

Quinto punto de muestreo: Quebrada de Sargento Mas

En esta zona se han desarrollado flujos de detritos violentos, estos se generan en la parte frontal del glaciar de escombros instalado en esta quebrada (Figuras 33 y 34)

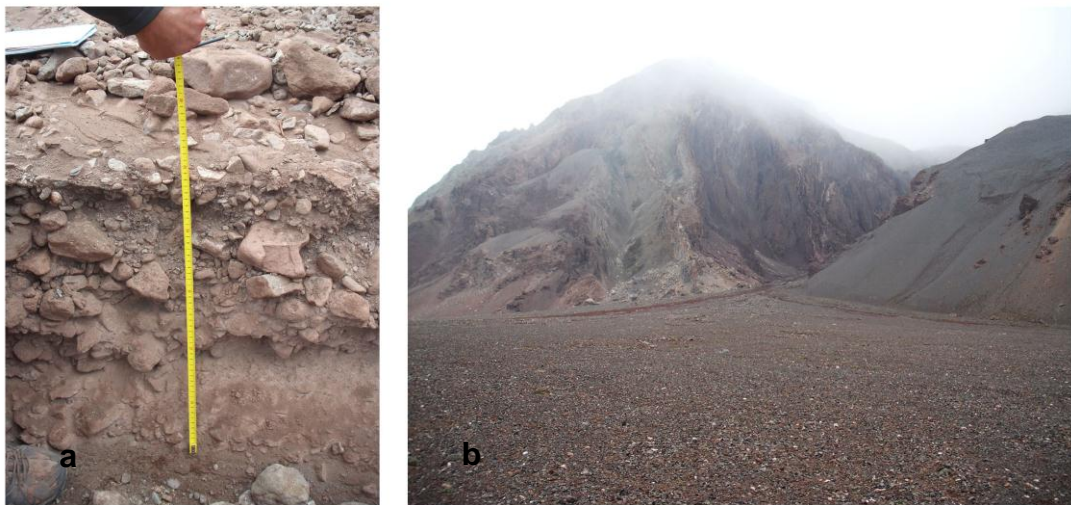


Figura 33: Punto de muestreo “Sargento Mas”. a) medición de perfil de uno de los cauces. b) vista frontal del abanico aluvial. Fuente: La Autora.

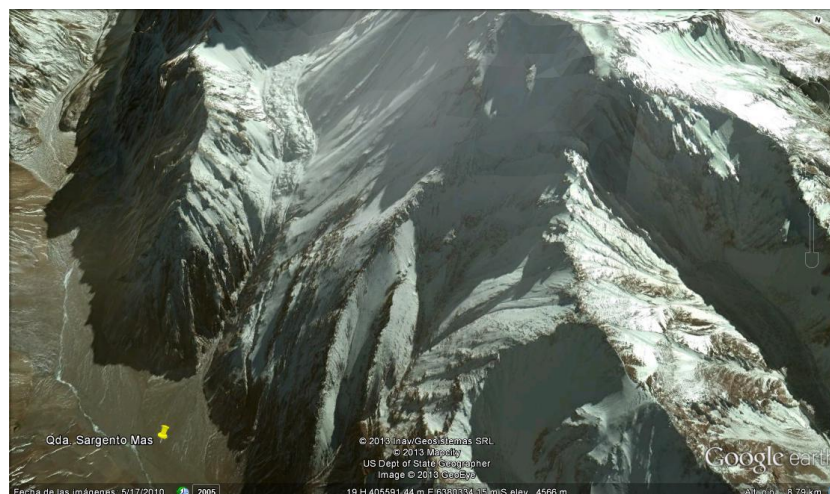


Figura 34: Imagen satelital de Google Earth indicando el punto de muestro “Sargento Mas”.

7.2. Análisis de muestras en el Laboratorio

A continuación se muestran los resultados de los análisis de laboratorio. Esta información tiene por objeto describir las características de los depósitos identificados en cinco sitios de encauzamiento de flujos de detritos presentes en el área de estudio. Por lo tanto esta información no es representativa del total de eventos observados.

En la tabla 9 se observan los porcentajes de las fracciones mayores y menores a 2 mm presentes en las muestras de depósitos de flujos de detritos extraídas en los sitios analizados.

Tabla 9: proporción gravimétrica (%) de las fracciones menores y mayores a 2 mm para cada una de las capas de los distintos puntos de muestreo.

Depósitos de flujos de detritos	Fracción	Peso en % por sitio				
		Los Colorados	Horcones Inferior	Sargento Mas	La vega	Los Grises
C1	< 2 mm	69	61	50	62	48
	> 2mm	31	39	50	38	52
C2	< 2 mm	62	65	60	79	52
	> 2mm	38	35	40	21	48
C3	< 2mm	54	64	53	60	75
	> 2mm	46	36	47	40	25

Los valores de conductividad hidráulica obtenidos para el sitio “Los Grises” indicaron que las muestras tomadas presentan una permeabilidad moderada. En el sitio “Horcones Inferior” los depósitos muestreados presentaron una permeabilidad moderadamente lenta para los correspondientes a los dos eventos mas recientes, mientras que el depósito del flujo de mayor antigüedad presentó una permeabilidad lenta. Para el sitio “Los Colorados” las muestras presentaron una permeabilidad moderada a moderadamente rápida. En las muestras tomadas en el sitio “La Vega”, se determinó que la permeabilidad fue moderadamente lenta y moderada. Por último en el sitio “Sargento Mas” las muestras presentaron una permeabilidad moderadamente rápida, muy rápida y rápida (Tabla 10).

Tabla 10: conductividad hidráulica para cada una de las capas de los distintos puntos de muestreo.

SITIO	Depósitos de flujos de detritos	K_p [mm/h]	Categoría de permeabilidad
Los Grises	C1	25,94	Moderada
	C2	25,67	Moderada
	C3	24,92	Moderada
Horcones Inferior	C1	11,53	Moderadamente lenta
	C2	7,91	Moderadamente lenta
	C3	2,48	Lenta
Los Colorados	C1	21,81	Moderada
	C2	42,72	Moderada
	C3	72,20	Moderadamente rápida
La Vega	C1	14,14	Moderadamente lenta
	C2	26,04	Moderada
	C3	23,60	Moderada
Sargento Mas	C1	98,81	Moderadamente rápida
	C2	267,73	Muy rápida
	C3	160,64	Rápida

Se observó que el contenido de materia orgánica no es significativo en estos sistemas como es de esperar en los ambientes de los Andes áridos. Como valores más altos en contenido de materia orgánica se encontró 1,41% en el flujo más antiguo analizado en la Quebrada del Sargento Mas y 1,20% en el flujo mas antiguo del sitio Los Colorados. Los valores mas bajos oscilaron entre 0,06% y 0,29% (Tabla 11).

Tabla 11: materia orgánica oxidable (%) para cada una de las capas en los distintos puntos de muestreo.

SITIO	Depósitos de flujos de detritos	MO%
Los Grises	C1	0,23
	C2	0,71
	C3	0,14
Horcones inferior	C1	0,12
	C2	0,29
	C3	0,12
Los Colorados	C1	0,06
	C2	0,12
	C3	1,20
La Vega	C1	0,19
	C2	0,06
	C3	0,06
Sargento Mas	C1	0,09
	C2	0,08
	C3	1,41

Con respecto a la textura, se observa que las muestras de depósitos analizadas presentaron texturas correspondientes a suelos de tipo franco arenoso, arenoso y arenoso franco (Tabla 12). El predominio de las fracciones gruesas afecta el comportamiento del suelo en el sentido de otorgar baja plasticidad y adhesividad, y baja capacidad de retención de agua. Además la percolación y el drenaje interno son excesivos.

Tabla 12: Análisis textural por densimetría.

SITIO	Depósito de flujos de detritos	(< 2 μ.) g%g	(2 - 20 μ.) g%g	(2 - 50 μ.) g%g	Tipo de suelo (Clasificación Internacional)	Tipo de suelo (Clasificación Americana)
Los Grises	C1	2,5	17,5	34,5	Franco Arenoso	Franco Arenoso
	C2	2,5	14,5	36,0	Franco Arenoso	Franco Arenoso
	C3	2,5	8,5	30,5	Arenoso	Franco Arenoso
Horcones inferior	C1	1,5	24,5	31,5	Franco Arenoso	Franco Arenoso
	C2	2,0	22,0	30,0	Franco Arenoso	Franco Arenoso
	C3	2,0	22,5	30,0	Franco Arenoso	Franco Arenoso
Los Colorados	C1	2,5	22,5	30,0	Franco Arenoso	Franco Arenoso
	C2	1,5	18,5	27,5	Franco Arenoso	Arenoso Franco
	C3	1,5	19,5	29,5	Franco Arenoso	Franco Arenoso
La Vega	C1	0,5	17,0	24,0	Franco Arenoso	Arenoso Franco
	C2	1,0	23,5	32,0	Franco Arenoso	Franco Arenoso
	C3	0,5	17,0	25,5	Franco Arenoso	Arenoso Franco
Sargento Mas	C1	1,0	1,0	12,0	Arenoso	Arenoso Franco
	C2	0,5	2,5	9,0	Arenoso	Arenoso
	C3	0,5	2,5	8,0	Arenoso	Arenoso

A partir del análisis granulométrico por tamizado se observó que en el sitio de muestreo “Los Grises” se observa un claro predominio de las fracciones granulométricas gruesas (arena). Presentando todas las muestras entre un 21 y 25 % de fracción fina de tamaño menor a 53 μm (limo + arcilla) (Figura 35).

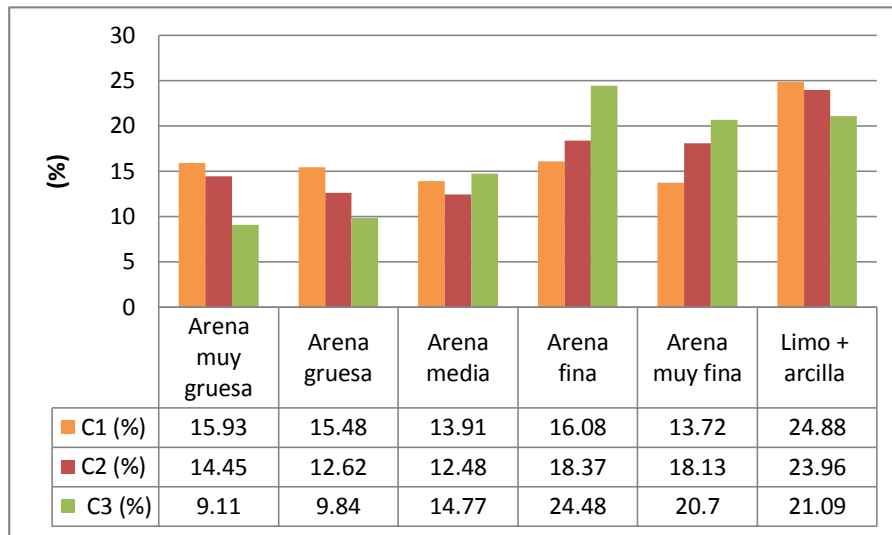


Figura 35: proporción de fracciones granulométricas (%) para las distintas capas de depósitos de flujos analizados en el sitio Los Grises.

En el sitio de muestreo “Horcones Inferior” se observa un claro predominio de las fracciones granulométricas gruesas (arena). Presentando todas las muestras entre un 12 y 17 % de fracción fina de tamaño menor a 53 μm (limo + arcilla) (Figura 36).

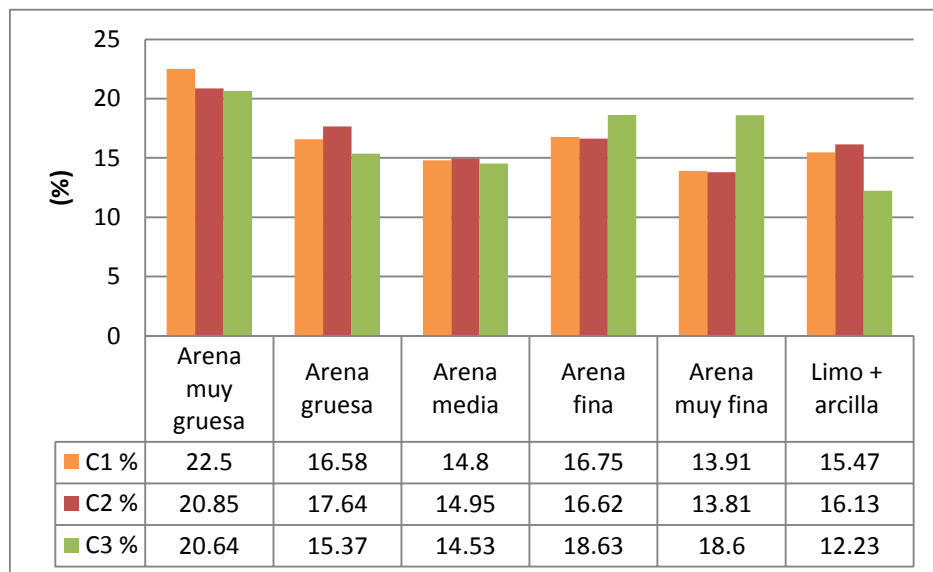


Figura 36: proporción de fracciones granulométricas (%) para las distintas capas de depósitos de flujos analizados en el sitio Horcones Inferior.

En el sitio de muestreo “Los Colorados” se observa predominio de las fracciones granulométricas gruesas (arena). Presentando todas las muestras entre un 7 y 12 % de fracción fina de tamaño menor a 53 μm (limo + arcilla) (Figura 37).

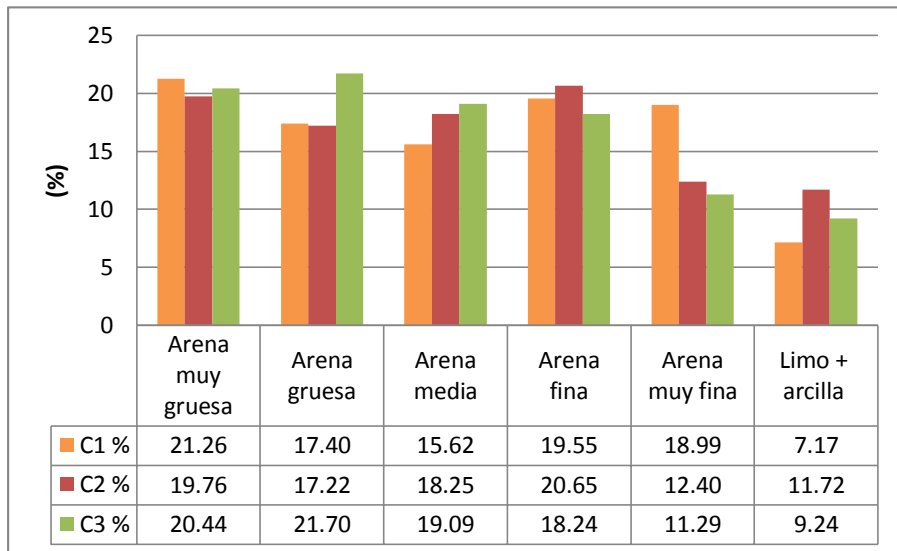


Figura 37: proporción de fracciones granulométricas (%) para las distintas capas de depósitos de flujos analizados en el sitio Los Colorados.

En el sitio de muestreo “La Vega” se observa un predominio de las fracciones granulométricas gruesas (arena). Presentando todas las muestras entre un 9 y 11 % de fracción fina de tamaño menor a 53 μm (limo + arcilla) (Figura 38).

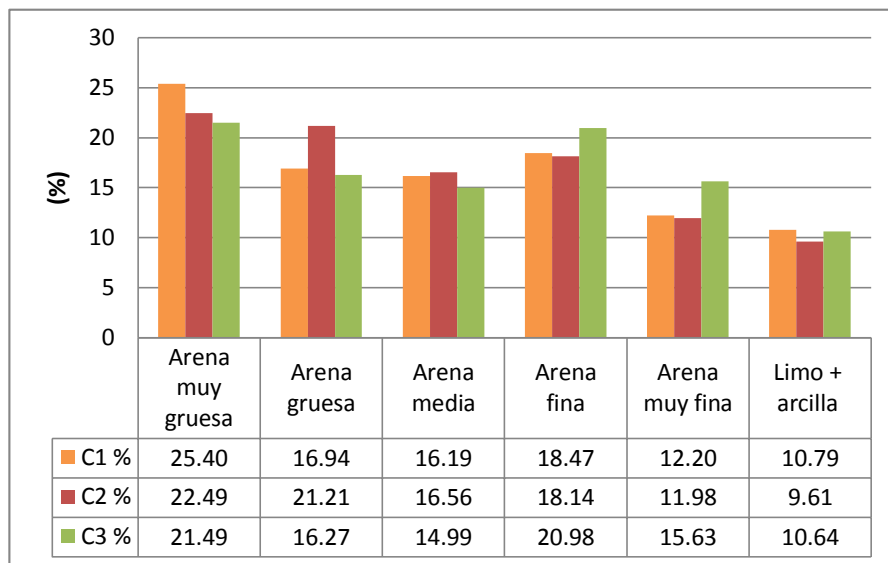


Figura 38: proporción de fracciones granulométricas (%) para las distintas capas de depósitos de flujos analizados en el sitio La Vega.

En el sitio de muestreo “Sargento Mas” se observa un predominio de las fracciones granulométricas gruesas (arena). Presentando todas las muestras entre un 4 y 7 % de fracción fina de tamaño menor a 53 μm (limo + arcilla) (Figura 39).

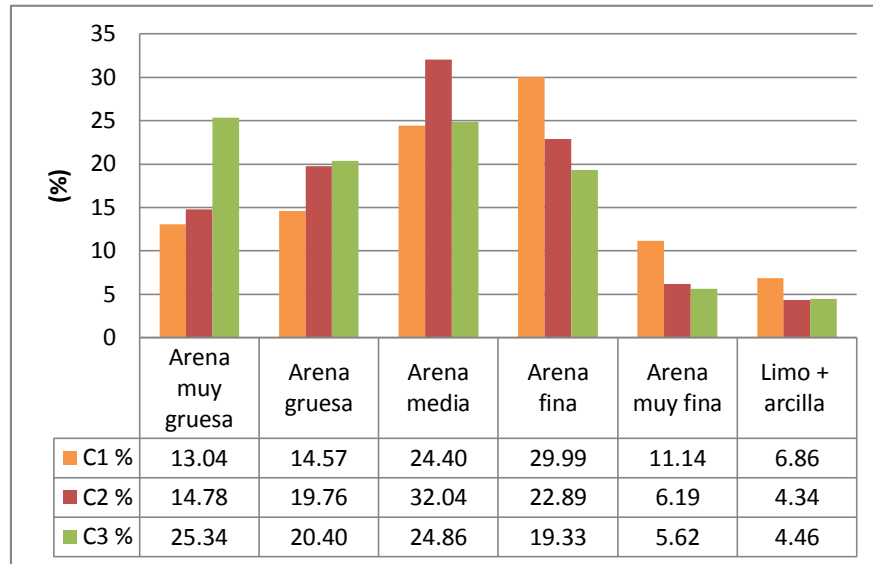


Figura 39: proporción de fracciones granulométricas (%) para las distintas capas de depósitos de flujos analizados en el sitio Sargento Mas.

7.3. Inventario de flujos de detritos

En la figura 40 se observa el mapa inventario de flujos de detritos para el área del Parque Provincial Aconcagua. El mismo fue digitalizado a partir del inventario de [Randis \(2012\)](#). Se representan las zonas de iniciación de los flujos de detritos mediante puntos. Los puntos rojos representan los flujos de detritos empleados en el proceso de ejecución de los modelos y los puntos azules los que fueron empleados en el proceso de validación espacial de los resultados.

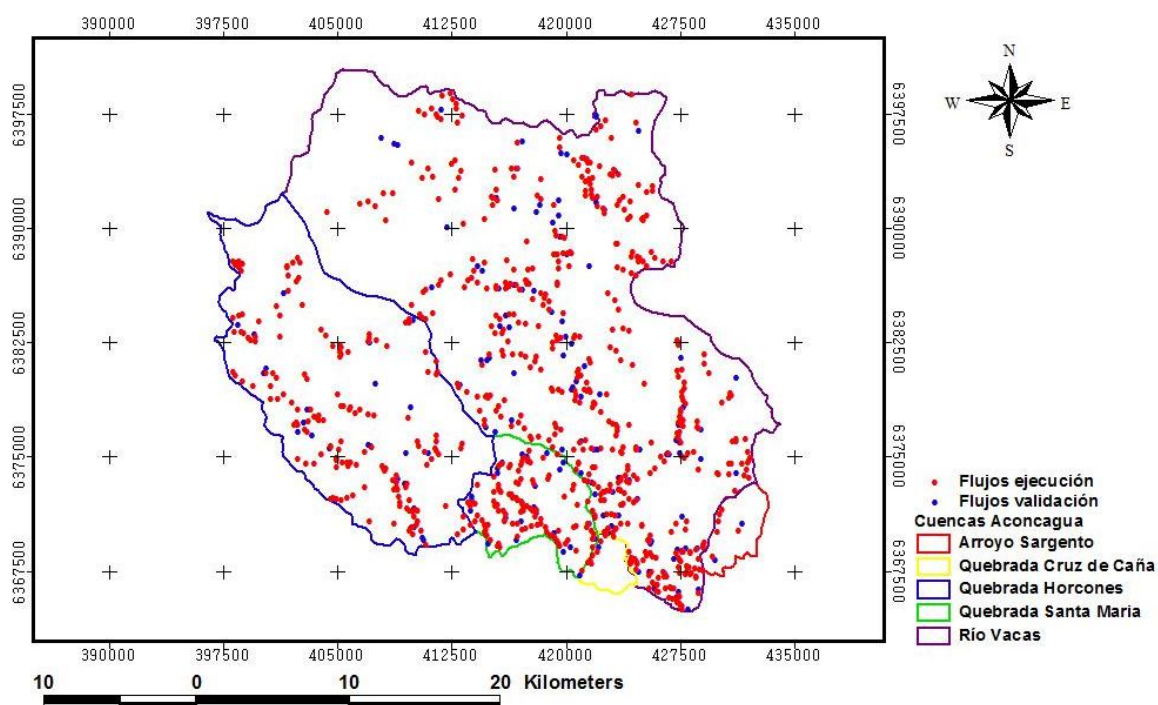


Figura 40: Inventario de flujos de detritos representados como puntos en sus zonas de iniciación y cuencas del Parque Provincial Aconcagua.

7.4. Análisis estadístico descriptivo

7.4.1. Análisis descriptivo por cuenca

La cuenca del Río Vacas es la que abarca mayor superficie en el área de estudio siendo esta de 56.177 hectáreas, presenta alturas máximas de 6.900 msnm. y medias de 4.142 msnm. La cuenca Quebrada Horcones posee una superficie de 23.270 hectáreas y alturas máximas de 6.900 msnm. y medias de 4.354 msnm. Las cuencas Quebrada Santa María, Arroyo Sargento y Quebrada Cruz de Caña abarcan superficies menores de 5.006, 1.602 y 933 hectáreas respectivamente (Tabla 13).

Tabla 13: Superficie, perímetro y altura de las cuencas del PPA.

Cuenca	Perímetro (km)	Superficie (Ha.)	Alturas (msnm)		
			Mínima	Máxima	Media
A° Sargento	18,38	1602,21	2695	4580	3678
Rio Vacas	129,64	56177,04	2400	6900	4142
Qda. Cruz de Caña	13,41	932,75	2721	4140	3301
Qda. Santa María	33,64	5006,48	2827	4920	3770
Qda. Horcones	82,18	23269,72	2920	6900	4354

Las mayores pendientes se observan en la cuenca Quebrada Horcones, siendo la máxima de 81°. En la cuenca del Río Vacas existen pendientes máximas de 78° y en la cuenca Quebrada Santa María de 74°. Las cuencas Arroyo Sargento y Quebrada Cruz de Caña presentan pendientes máximas de 58° y 45° respectivamente. Las pendientes medias en general para las cuencas del Parque Aconcagua oscilan entre 23° y 28°.

Tabla 14: Pendientes máximas y medias de las cuencas del Parque Provincial Aconcagua.

Cuenca	Pendiente (grados)		DE
	Máxima	Media	
A° Sargento	57,66	27,62	8,45
Rio Vacas	78,01	25,39	10,81
Qda. Cruz de Caña	45,23	22,97	7,44
Qda. Santa María	74,47	24,49	9,92
Qda. Horcones	80,64	27,95	12,34

Al analizar el número de flujos de detritos encontrados por cuenca, se observa que, la cuenca del Río Vacas presenta mayor cantidad, habiéndose inventariado 586 zonas de iniciación de flujos. Esta zona presenta una densidad 1,04 flujos/km². La cuenca Quebrada Horcones presenta 188 zonas de iniciación de flujos de detritos y una densidad de 0,8 flujos/km². En la cuenca Quebrada Santa María se identifican 130 zonas de iniciación de flujos, presentando una densidad de 2,6 flujos/km². En las cuencas Arroyo Sargento y Quebrada Cruz de Caña se identifican solamente 8 y 11 zonas de iniciación de flujos de detritos respectivamente, la primera con una densidad de 0,5 flujos/km² y la segunda de 1,18 flujos/km² (Tabla 15).

Tabla 15: Número de flujos por cuenca. Densidad de flujos de detritos (Nº flujos/Km²)

Cuenca	Nº de flujos	Densidad (Nº flujos/km ²)
A° Sargento	8	0,50
Qda. Cruz de Caña	11	1,18
Qda. Horcones	188	0,80
Qda. Santa María	130	2,60
Rio Vacas	586	1,04

7.4.2. Medidas descriptivas de tendencia y posición central para los flujos de detritos

Como se mencionó anteriormente en el área del Parque Aconcagua se han identificado 923 zonas de iniciación de flujos de detritos, las mismas se encuentran desde los 2.637 msnm. La elevación promedio de las zonas de iniciación de los eventos es de 3.991 msnm. y alcanzan alturas máximas de 5.486 msnm. con una amplia distribución (DE=527), poniendo de manifiesto el riesgo que implican estos eventos (Tabla 16) (Figura 41). El error en las estimaciones de las alturas es de 30 m (resolución espacial del MDE).

Debido a la relación que existe entre las geoformas, se puede vincular este resultado con las estimaciones de Randis (2012), quien determina que los conos aluviales se desarrollan en elevaciones comprendidas entre los 2.404 y 4.760 msnm (DE=402)

La pendiente media de las zonas de iniciación de flujos es de 30 y la máxima de 56.

Tabla 16: Medidas descriptivas de tendencia y posición central para elevaciones y pendientes de los flujos de detritos.

Resumen	Elevaciones (msnm)	Pendientes (grados)
n	923	923
Media	3991	30
D.E.	527	8
Mín	2637	0
Máx	5486	56
P(05)	3042	14
P(10)	3288	18
P(25)	3632	25
P(50)	4021	31
P(75)	4358	35
P(90)	4625	39
P(95)	4859	42

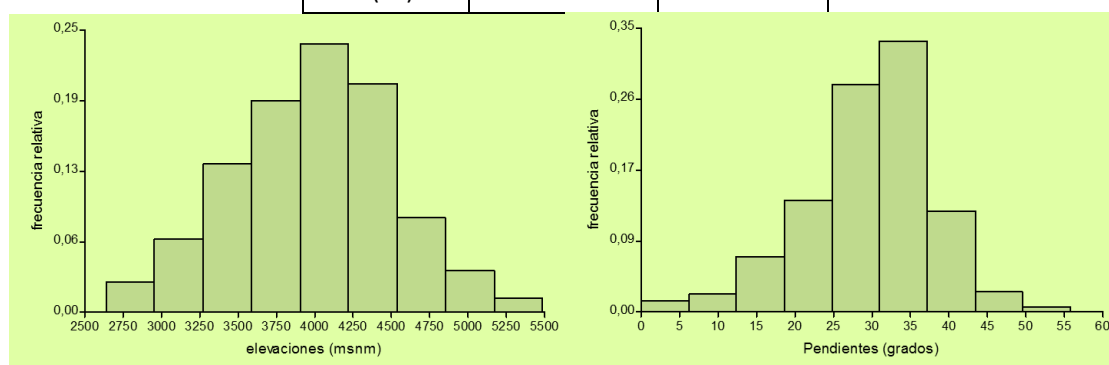


Figura 41: Histograma de elevaciones (msnm) y pendientes (grados) de los flujos de detritos.

7.5. Análisis de Susceptibilidad

7.5.1. Statistical index (Wi) method de Van Westen (1997)

A) Análisis descriptivo, evaluación de factores: normalización

Para el análisis se utilizó el mapa inventario constituido por los 766 flujos empleados en la ejecución de los modelos. La densidad de flujos para toda el área analizada en función de los flujos empleados para el proceso de ejecución es de 0,88 flujos por Km².

Evaluación de la variable de susceptibilidad litológica:

La alta cantidad de flujos con respecto al área de los afloramientos evidencia un alto grado de susceptibilidad para las formaciones La Manga, Granito Cruz de Caña, y Alto Tupungato (Tabla 17) (Figura 42). La formación La Manga representa secuencias marinas de edad jurásica inferior a media y está compuesta por calizas. Esta litología representa sólo un 0,1% del área total analizada y está presente en la cuenca Quebrada Santa María. La formación Alto Tupungato de edad carbonífera media a pérmica inferior constituida por depósitos altamente deformados y parcialmente metamorfizados, fuertemente alterada por cuerpos pérmicos, representa un 6,3% de la superficie total. Está presente en las cuencas Quebrada Santa María, Río Vacas, Arroyo Sargento y Quebrada Cruz de Caña. Esta litología se encuentra intruida por granitoides pérmicos de la formación Cruz de Caña, la cual representa un 1,2% del área total analizada. Esta última formación se encuentra presente en las cuencas Quebrada Santa María, Río Vacas y Arroyo Sargento. Este resultado concuerda con lo encontrado por [Moreiras \(2009\)](#) quien también identificó una alta susceptibilidad para estas litologías en la zona de los valles del Río Cuevas y Mendoza.

Tabla 17: Susceptibilidad de cada clase litológica (SL) obtenida en función de la relación entre la densidad de flujos de cada formación y la densidad de flujos para toda el área analizada.

<i>Unidades Litológicas</i>	<i>Superficie</i>		<i>Nº de flujos</i>	<i>Densidad de flujos (Nº flujos/Km²)</i>	<i>Valor SL (ec. 13)</i>	<i>Wi (ec. 1)</i>
	<i>(Km²)</i>	<i>(%)</i>				
Formación la Manga	0,51	0,1	2	3,89	4,42	1,49
Granito Cruz de Caña	10,23	1,2	26	2,54	2,89	1,06
Formación Alto Tupungato	54,31	6,3	105	1,93	2,20	0,79
Formación Vaca Muerta	21,32	2,5	31	1,45	1,65	0,50
Conglomerado Santa_María	87,15	10,1	128	1,47	1,67	0,51
Formación Juncal	19,37	2,2	26	1,34	1,52	0,42
Grupo Choiyoi	252,38	29,2	253	1,00	1,14	0,13
Formación Agrío	35,59	4,1	33	0,93	1,05	0,05
Formación Auquilco	14,10	1,6	11	0,78	0,89	-0,12
Formación Diamante	69,04	8,0	55	0,80	0,90	-0,10
Traquitas Puente de Inca	3,67	0,4	2	0,54	0,62	-0,48
Depósitos aterrizados	1,29	0,2	0	0,00	0,00	--
Formación Tordillo	29,45	3,4	15	0,51	0,58	-0,55
Depósitos glaciares	38,55	4,5	19	0,49	0,56	-0,58
Depósitos aluviales	49,73	5,8	15	0,30	0,34	-1,07
Complejo volcánico Aconcagua	177,39	20,5	43	0,24	0,28	-1,29
Volcanitas Laguna Seca	0,38	0,04	0	0,00	0,00	--

Si bien estas formaciones presentan gran susceptibilidad al analizar la densidad de flujos, el porcentaje que representan en el área total analizada es muy bajo. En la zona del ingreso al Parque Provincial Aconcagua por la quebrada del Río Vacas están presentes las formaciones Alto Tupungato y Granito Cruz de Caña, lo que implicaría mayor susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos con respecto a la litología en esa zona.

A su vez, numerosos flujos de detritos se han producido a partir de los Conglomerados de Santa María (Terciario) compuestos principalmente por conglomerados y tobas, y a partir del Grupo Choiyoi, secuencia volcánica de edad permo-triásica intruida por granitoides triásicos. El Grupo Choiyoi representa un 29% y los Conglomerados Santa María un 10% del área total y están involucrados, respectivamente, en el 33% y 17% de los flujos inventariados. Ambos se encuentran principalmente en la cuenca "Río Vacas" resaltando la gran susceptibilidad a la ocurrencia de flujos, analizada en base a la litología, que presenta esta quebrada.

Moreiras (2009) también encontró que la mayor cantidad de flujos para la zona de los valles del Río Cuevas y Mendoza está asociada a las rocas friables del Grupo Choiyoi. Atribuye este hecho en parte a la amplia distribución areal de esta clase litológica en la zona de estudio (51%) y a la presencia de niveles tobáceos friables que favorecen a la inestabilidad.

Las formaciones menos susceptibles son Volcanitas Laguna Seca y los Depósitos aterrizados donde no se identificó ningún flujo, y el Complejo volcánico Aconcagua que presentó una densidad de 0,2 flujos/km².

En los depósitos aluviales se identificaron 15 flujos, esto puede deberse a errores en la digitalización del mapa litológico y del inventario, y a la resolución espacial de la imagen satelital utilizada en el inventario (10 m) ya que estos depósitos se encuentran en zonas de bajas pendientes donde no hay zonas de iniciación de flujos.

Evaluación de la variable pendiente

En el área de estudio, las pendientes extremadamente fuertes, que superan los 55°, no presentan flujos de detritos. Posiblemente esto se deba a la escasa distribución de estas pendientes en la región (0,9%). En la tesis de [Esper Angillieri \(2010\)](#), se atribuye como posible causa de que a pendientes mayores a 30° haya menor cantidad de procesos de remoción en masa, el hecho de que a elevadas pendientes la cobertura detrítica se hace prácticamente nula, las rocas aflorantes están expuestas a continua meteorización por lo que son más comunes procesos como caída de rocas y talus.

Analizando el valor SP (valor normalizado), se observa que las pendientes más susceptibles son las pendientes que van desde los 35° a los 55°, éstas sólo representan el 19,8% de la superficie del área y presentaron 199 eventos. Sin embargo, las pendientes más afectadas son las comprendidas entre un rango de 16-35°, presentan 517 flujos, son las pendientes más dominantes en el área de estudio, estando representadas en el 59,4% del área total (Tabla 18) (Figura 42). Esto concuerda con lo obtenido por [Moreiras \(2009\)](#) quien observó para la zona de los Valles del Rio Cuevas y Mendoza, que los flujos se generan en pendientes entre 15°-30°.

Las pendientes más bajas se asocian a los flujos pequeños en las planicies o encauzados en los fanglomerados ([Moreiras, 2009](#)). Las pendientes moderadas (8°-16°) representan un 13,9% del área total y presentan un total de 35 flujos. Las pendientes bajas (4°-8°) con un 3,4% de la superficie analizada presentan 6 eventos. Las planicies (0°-2°) con 7 eventos y, las pendientes muy bajas (2°-4°) con solo 2 eventos representan un 1,6% y 1% del área total respectivamente. Estos 9 eventos identificados en pendientes 0°-4° pueden deberse a errores la digitalización del mapa inventario y a la resolución espacial de la imagen satelital utilizada en el inventario (10 metros). Los flujos de detritos suelen originarse en pendientes más abruptas pero una vez generados, pueden movilizarse por suaves pendientes, por lo tanto pueden haber ocurrido errores en la digitalización de las zonas de iniciación.

Tabla 18: Susceptibilidad (SP) de cada clase de pendiente obtenida en función de la relación entre densidad de flujos de cada clase y la densidad para toda el área de estudio.

Clase de pendiente		Superficie		Nº de flujos	Densidad (Nº flujos/Km ²)	Valor SP. (ec. 13)	Wi (ec1.)
(grados)	Condición del terreno	(Km ²)	(%)				
0-2	Planicie sin denudación apreciable	13,99	1,6	7	0,50	0,57	-0,57
2-4	Pendiente muy baja	8,58	1,0	2	0,23	0,26	-1,33
4-8	Pendiente baja	29,09	3,4	6	0,21	0,23	-1,45
8-16	Pendiente moderada	120,18	13,9	35	0,29	0,33	-1,11
16-35	Pendiente fuerte	519,25	59,4	517	1,00	1,13	0,12
35-55	Pendiente muy fuerte	171,04	19,8	199	1,16	1,32	0,28
Mayor a 55	Pendiente extremadamente fuerte	7,53	0,9	0	0,00	0,00	--

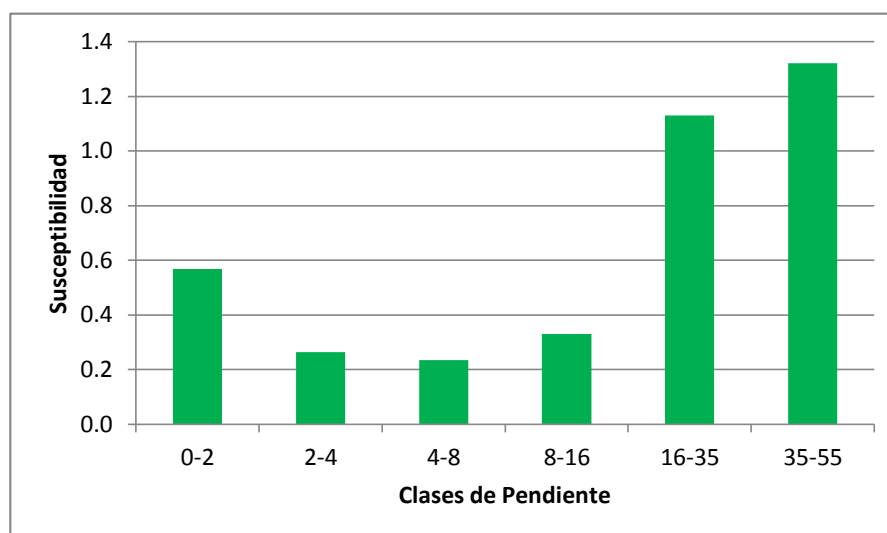


Figura 42: Susceptibilidad para cada categoría de pendiente.

Evaluación de la variable orientación

La cantidad de flujos con respecto al área de cada categoría evidencia un alto grado de susceptibilidad para las laderas con orientación NE, presentando una densidad de 4,2 flujos de detritos/km². Estas orientaciones son las menos predominantes en el área de estudio, pero las que presentan mayor cantidad de flujos, 175 flujos (Tabla 19) (Figura 43).

Moreiras (2004b) encontró que las laderas que miran al sur tienen una tendencia mayor a la inestabilidad en las nacientes de Cordillera Frontal; el 48,7% de los procesos de remoción en masa identificados en esta provincia geológica tienen dirección Sur, Sureste o Suroeste,

probablemente, debido a que las laderas que miran al sur son más sombrías y frías, con predominio de acumulación de nieve y la meteorización física por el proceso de descongelamiento-congelamiento. En contraposición, las laderas que miran al norte reciben mayor exposición y radiación solar; en consecuencia, resultan más secas previo a la ocurrencia de tormentas y por lo tanto toman más tiempo en alcanzar el mismo grado de saturación.

Estas observaciones se contradicen con lo encontrado en este estudio para el caso particular de flujos de detritos. Esto puede deberse a que en el área de estudio, los flujos de detritos se inician generalmente por el rápido derretimiento de la nieve. Las laderas que miran al N y NE reciben más radiación por lo tanto el proceso de fusión de la nieve se produce más rápidamente.

Tabla 19: Susceptibilidad (SO) de cada clase de orientación obtenida en función de la relación entre densidad de flujos de cada clase y la densidad para toda el área de estudio.

Clases de orientaciones		Superficie		Nº de flujos	Densidad (Nº flujos/Km ²)	Valor SO. (ec. 13)	Wi (ec.1)
Puntos cardinales	(grados con respecto N)	(Km ²)	(%)				
N	337,5-22,5	53,90	6,2	111	2,06	2,34	0,85
NE	22,5-67,5	41,62	4,8	175	4,20	4,77	1,56
E	67,5-112,5	125,52	14,4	149	1,19	1,35	0,30
SE	112,5-157,5	139,77	16,1	76	0,54	0,62	-0,48
S	157,5-202,5	126,35	14,5	49	0,39	0,44	-0,82
SO	202,5-247,5	114,32	13,1	79	0,69	0,78	-0,24
O	247,5-292,5	141,85	16,3	76	0,54	0,61	-0,50
NO	292,5-337,5	126,56	14,6	49	0,39	0,44	-0,82

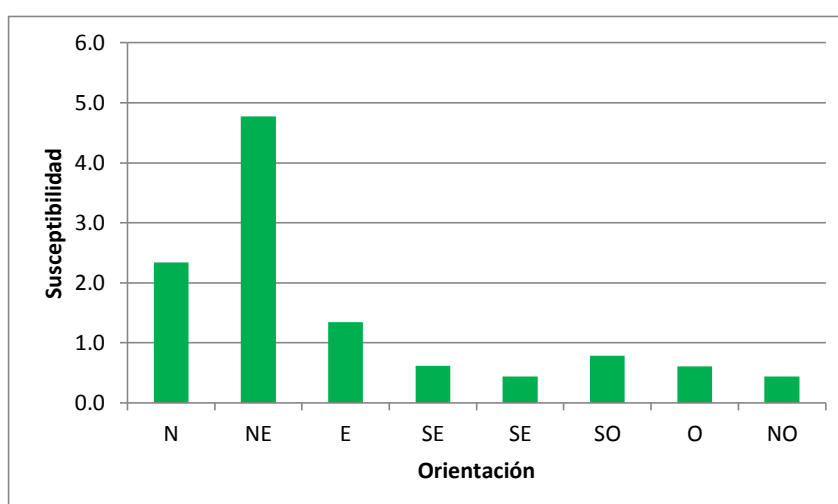


Figura 43: Susceptibilidad para cada categoría de orientación.

Evaluación de la variable altura

La mayor densidad de flujos se identificó en las categorías que van desde los 2.900 msnm. hasta los 4.400 msnm. coincidente con el dominio de los procesos periglaciales, disminuyendo en elevaciones superiores donde predominan los procesos glaciales. La categoría que va desde los 3.900 a los 4.400 msnm es la que presenta mayor porcentaje de superficie (32,3%) y mayor presencia de zonas de iniciación de flujos de detritos ya que se identificaron 278 eventos (Tabla 20) (Figura 44).

Tabla 20: Susceptibilidad (SA) de cada clase de altura obtenida en función de la relación entre densidad de flujos de cada clase y la densidad para toda el área de estudio.

Clases de altura (m.s.n.m.)	Superficie		Nº de flujos	Densidad (Nº flujos/Km ²)	Valor SA. (ec.13)	Wi (ec.1)
	(Km ²)	(%)				
2400-2900	16,30	1,9	11	0,67	0,77	-0,27
2900-3400	80,82	9,3	93	1,15	1,31	0,27
3400-3900	197,55	22,7	209	1,06	1,20	0,18
3900-4400	281,13	32,3	278	0,99	1,12	0,12
4400-4900	196,26	22,6	137	0,70	0,79	-0,23
4900-5400	73,78	8,5	36	0,49	0,55	-0,59
5400-5900	15,13	1,7	0	0,00	0,00	--
5900-6400	6,23	0,7	0	0,00	0,00	--
6400-6900	2,55	0,3	0	0,00	0,00	--

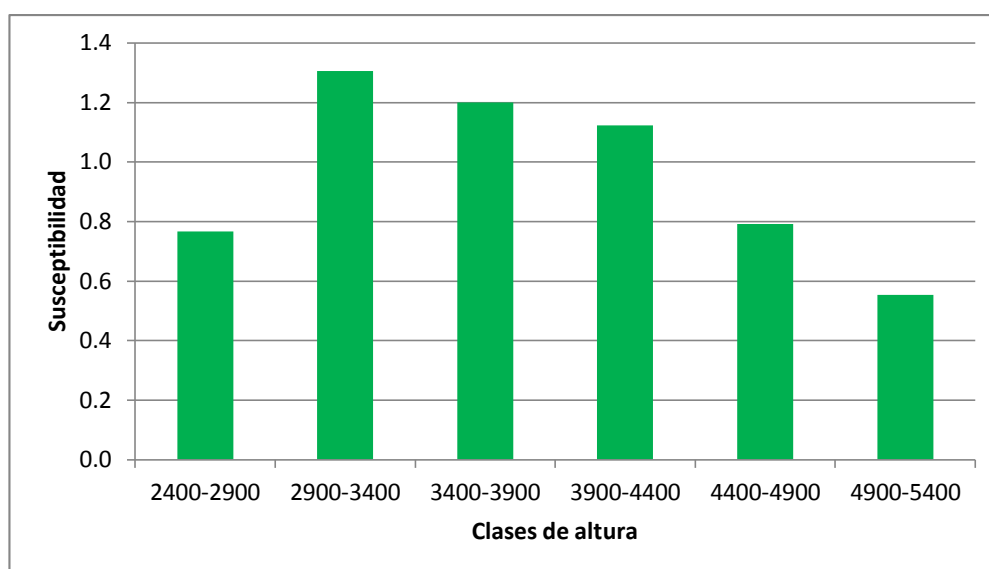


Figura 44: Susceptibilidad para cada categoría de altura.

Evaluación de la variable vegetación

Come se observa en la tabla 21, solamente un 15,48% del área de estudio tiene presencia de vegetación y un 84,52 % del área se encuentra sin presencia de comunidades vegetales, lo cual es característico de los Andes áridos. Del total de flujos tenidos en cuenta en este análisis, 640 se desarrollaron en zonas de ausencia de vegetación.

Tabla 21: Susceptibilidad (SV) de cada clase de presencia/ausencia de vegetación obtenida en función de la relación entre densidad de flujos de cada clase y la densidad para toda el área de estudio.

Clase	Superficie		Nº de flujos	Densidad (flujos/km2)	Valor SV (ec 13)	Wi (ec1)
	(Km2)	(%)				
Presencia de Vegetación	134,63	15,5	123	0,91	1,04	0,04
Ausencia de vegetación	735,25	84,5	640	0,87	0,99	-0,01

B) Cálculo del índice de susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos a partir del Wi (Van Westen, 1997)

A partir de la aplicación del **Wi** para cada una de las variables analizadas se calculó el Índice de susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos (ISFD) mediante la sumatoria de las distintas capas temáticas. El resultado de esta operación arroja el siguiente mapa de susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos para el Parque Provincial Aconcagua. Las estadísticas resumen se observan en la tabla 22, donde se muestran las diferentes categorías de estabilidad con el área, el numero de flujos y la densidad para cada una de ellas.

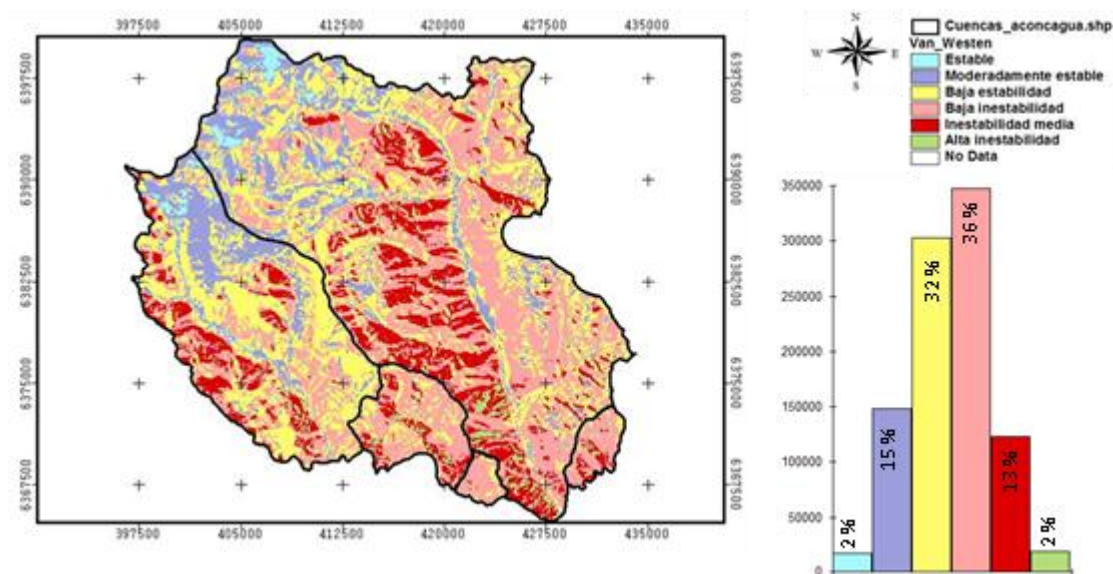


Figura 46: Mapa de susceptibilidad para el Parque Aconcagua obtenido mediante la aplicación del modelo Wi (Van Westen, 1997). Histograma con los porcentajes de áreas para cada categoría de estabilidad.

Tabla 22: Estadísticas resumen de la aplicación de del modelo Wi (Van Westen, 1997).

	Clases de Susceptibilidad						Total
	Estable	Moderadamente estable	Baja estabilidad	Baja inestabilidad	Inestabilidad media	Alta inestabilidad	
Área (Km ²)	15,56	133,39	272,88	312,26	111,11	17,38	862,57
% de Región	1,8	15,5	31,6	36,2	12,9	2,0	100
Nº flujos	0	22	134	342	215	53	766
% de flujos	0	2,9	17,5	44,6	28,1	6,9	100
Densidad (Nº flujos/Km ²)	0	0,16	0,49	1,08	1,94	3,05	0,89

En la tabla 23 se presentan los resultados de la validación espacial del mapa obtenido a partir del modelo *Wi* (Van Westen, 1997). Se observa la clasificación de los flujos en las distintas categorías como resultado de la superposición espacial del mapa de susceptibilidad con el mapa inventario constituido por los eventos que no han sido utilizados en el proceso de obtención de los resultados.

Tabla 23: Clasificación de flujos de detritos empleados en el proceso de validación por el modelo Wi (Van Westen, 1997).

	Clases de Susceptibilidad						Total
	Estable	Moderadamente estable	Baja estabilidad	Baja inestabilidad	Inestabilidad media	Alta inestabilidad	
Nº flujos	0	3	28	71	41	14	157
% de flujos	0	1,9	17,8	45,2	26,1	8,9	100
Densidad (Nº flujos/Km ²)	0	0,02	0,10	0,23	0,37	0,81	1,53

El enfoque bivariado calcula la frecuencia de los flujos de detritos con respecto a cada factor de entrada por separado, y el mapa de susceptibilidad final es una simple combinación de todos los factores, independientemente de su importancia relativa en la causa de eventos en una región particular (Nandi, 2009).

El mapa de susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos obtenido a partir del *Wi* (Figura 46) teniendo en cuenta los cinco factores condicionantes, revela que los valores del índice de susceptibilidad van desde -4,16 a 3,83.

Al observar la figura 46 se observa que la zona noroeste del parque, coincidente con la litología Complejo Volcánico Aconcagua, y las zonas bajas de los valles (depósitos aluviales) son clasificadas en las categorías de mayor estabilidad. Esta observación resalta la menor

susceptibilidad de éstas litologías. La ubicación de las litologías más susceptibles (Formación la Manga, Granito Cruz de Caña y Alto Tupungato) quedan clasificadas en el mapa en las tres categorías más inestables.

Con respecto a las alturas la zona noroeste del parque abarca alturas superiores a 4400 msnm. y las zonas bajas de los valles presentan alturas inferiores a 2900 msnm. Estas zonas quedan clasificadas por el modelo en las categorías de menor estabilidad, es decir que las alturas más susceptibles son las que van desde los 2900 msnm hasta los 4400 msnm.

Al analizar las orientaciones se observa que las zonas con orientación hacia el noreste quedan clasificadas como “inestabilidad media” evidenciando la mayor susceptibilidad de las laderas que presentan esta orientación. Con respecto a las laderas con orientación norte (N), también son clasificadas en la categoría “inestabilidad media” en las alturas comprendidas entre los 2900 msnm. y 4400 msnm. Las laderas orientadas hacia el este (E) quedan clasificadas en la categoría “baja inestabilidad”. Por lo tanto podemos decir que las laderas más inestables son las que presentan orientación noreste, norte y este (NE, N y E).

De acuerdo con este mapa, el 2 % del área total corresponde a zonas estables, el 15 % a moderadamente estables y 32% a zonas de baja estabilidad. Las zonas de baja inestabilidad, de inestabilidad media y alta inestabilidad presentan respectivamente un 36%, 13% y 2% del total del área (Figura 46) (Tabla 23). En la validación espacial se obtuvo que el 80% de los flujos empleados en el proceso de validación es clasificado en las tres categorías superiores (Baja inestabilidad= 45%, inestabilidad media= 26% y alta inestabilidad= 9%). Por lo tanto el modelo puede ser considerado bueno para el área del Parque Aconcagua.

El análisis llevado a cabo permite conocer las clases de cada variable más susceptible a ser afectada por procesos de remoción en masa en función de los valores de densidad normalizada de cada clase. Sin embargo, no determina la importancia relativa de cada variable en la valoración de la susceptibilidad, desconociendo de esta manera el carácter predictivo de cada variable. Como aspecto negativo de este modelo puede mencionarse el hecho de que el proceso de generación de los mapas temáticos lleva mucho tiempo. Además es importante destacar que estos resultados son únicamente aplicables al área analizada ya que no es posible extrapolar el modelo a otras regiones donde no se posea un inventario de eventos.

7.5.2. Análisis multivariado: regresión logística

El propósito es encontrar el modelo que mejor se ajusta para describir la relación entre la presencia o ausencia de un flujo de detrito y un conjunto de variables independientes.

La ecuación 15, muestra los coeficientes de las variables analizadas estimadas a partir del análisis de regresión logística.

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

(15)

Los p-valores asociados a estos coeficientes son significativos ($p < 0,0001$), por lo tanto estas variables tendrán un efecto significativo a la hora de explicar la probabilidad de ocurrencia de flujos de detritos en la zona del Parque Provincial Aconcagua. Con respecto a la variable pendiente el hecho de que tenga un coeficiente positivo y un *odds-ratio* levemente superior a uno (1,05), nos hace pensar que a pesar de ser una variable significativa, variaciones en la pendiente no provocarán prácticamente cambios en la probabilidad de ocurrencia de flujos de detritos. Al analizar las variables altura y orientación estas presentan un *odds-ratio* de 0,99 por lo tanto variaciones en estas variables no producen cambios en la probabilidad de ocurrencia de flujos de detritos. Las Litologías Complejo Volcánico Aconcagua y depósitos aluviales presentan un *odds-ratio* de 0,19 y 0,17 respectivamente por lo tanto la presencia de estas litologías disminuye la probabilidad de ocurrencia de flujos de detritos. Por último la variable presencia de vegetación presenta un *odds-ratio* de 0,60 lo que nos indica que la presencia de vegetación disminuye la probabilidad de que ocurran flujos de detritos.

En el trabajo de Carrara *et al.* (2007), donde se aplicó, entre otros modelos, la regresión logística para analizar la susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos en el ambiente alpino, la mayoría de las variables litológicas entraron en los modelos con coeficientes relativamente pequeños, lo que confirma que ninguno de los tipos de rocas parece desempeñar un papel dominante en la susceptibilidad flujo de escombros, con la excepción de las secuencias de espesor dolomítica. En nuestro caso, y en concordancia con lo obtenido a través de este modelo para la zona del Parque Aconcagua, ninguno de los tipos de rocas desempeña un papel significativo en la susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos excepto las litologías complejo Volcánico Aconcagua y depósitos aluviales.

De acuerdo con los resultados obtenidos mediante la aplicación del modelo de regresión logística, el 15% del área total es clasificada como estable, el 14% como moderadamente estable y el 21% como zonas de baja estabilidad. Las categorías de mayor inestabilidad quedan representadas por un 29% del área en el caso de baja inestabilidad, un 19% para inestabilidad media y un 2% para alta inestabilidad (Figura 47).

Al igual que en el caso del modelo W_i (Van Westen, 1997) al observar el mapa (Figura 47) se observa que la zona noroeste del Parque Aconcagua y las zonas bajas de los valles son clasificadas en las categorías de mayor estabilidad. En este caso se observa más homogeneidad en esa zona quedando clasificada mayoritariamente como estable. A su vez se observa en el valle del Río de Las Vacas una zona relativamente homogénea clasificada como de inestabilidad media en el ingreso a la quebrada y en las laderas con orientación NE y E.

El mapa resultado de la aplicación de este modelo para la zona del Parque Provincial Aconcagua, se observa en la figura 47 y las estadísticas asociadas se muestran en la tabla 24.

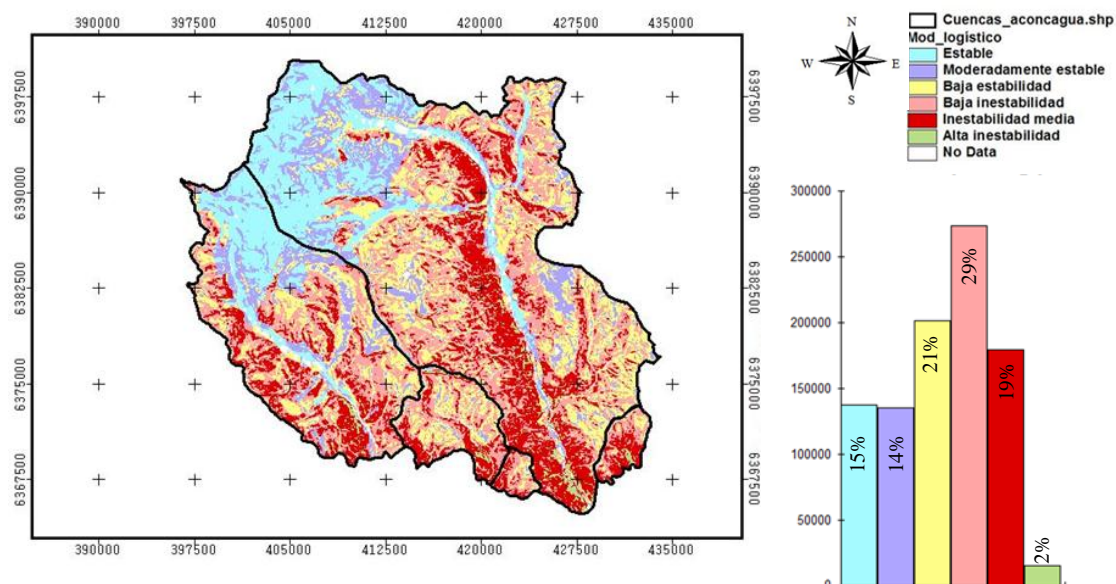


Figura 47: Mapa de susceptibilidad para el Parque Aconcagua obtenido mediante la aplicación del modelo de Regresión Logística. Histograma con los porcentajes de áreas para cada categoría de estabilidad.

Tabla 24: Estadísticas resumen de la aplicación del modelo de Regresión Logística.

	Clases de Susceptibilidad						Total
	Estable	Moderadamente estable	Baja estabilidad	Baja inestabilidad	Inestabilidad media	Alta inestabilidad	
Área (Km ²)	123,85	121,45	181,61	246,42	161,43	14,03	848,78
% de Región	14,6	14,3	21,4	29,0	19,0	1,7	100
Nº flujos	17	46	107	277	290	29	766
% de flujos	2,2	6,0	14,0	36,2	37,9	3,8	100
Densidad (Nº flujos/Km ²)	0,14	0,38	0,59	1,12	1,80	2,06	0,90

En la validación espacial se obtuvo que el 81% de los flujos empleados en este proceso es clasificado en las tres categorías superiores (Baja inestabilidad= 34%, inestabilidad media= 43% y alta inestabilidad= 4%). Por lo tanto la aplicación de la regresión logística para el análisis de la susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos es apropiado para la zona de estudio.

En la tabla 25 se presentan los resultados de la validación espacial del modelo de Regresión Logística. Se observa la clasificación de los flujos en las distintas categorías como resultado de la superposición espacial del mapa de susceptibilidad con el mapa inventario constituido por los eventos que no han sido utilizados en el proceso de obtención de los resultados de cada modelo.

Tabla 25: Clasificación de flujos de detritos empleados en el proceso de validación por el modelo de Regresión Logística.

	Clases de Susceptibilidad						Total
	Estable	Moderadamente estable	Baja estabilidad	Baja Inestabilidad	Inestabilidad media	Alta inestabilidad	
Nº flujos	1	7	23	53	67	6	157
% de flujos	0,6	4,5	14,6	33,8	42,7	3,8	100
Densidad (Nº flujos/Km ²)	0,01	0,06	0,13	0,22	0,42	0,43	0,18

La regresión logística ha sido encontrada apropiada para la determinación de la susceptibilidad a la ocurrencia de procesos de remoción en masa por varios autores (Duman *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2006; Nandi *et al.*, 2009; Akgum, 2012; Chauhan *et al.*, 2010) La literatura de los últimos 10 años muestra un claro aumento en el uso de análisis de regresión múltiple (Akgum, 2012).

En el trabajo de Chauhan *et al.*, (2010) se citan investigadores que han aplicado la regresión logística para la zonificación de susceptibilidad, tales como Lee (2005), Ohlmacher y Davis (2003), Dai y Lee (2002), Yesilnacar y Topal (2005), Dai *et al.* (2001), y Gorsevski *et al.* (2000), estos han encontrado que este enfoque produce resultados más precisos en el rendimiento predictivo global que otros enfoques cuantitativos.

Como ventajas de éste modelo podemos mencionar el hecho de que es útil para modelar la vulnerabilidad de un evento ocurriendo como función de otros factores, porque la variable dependiente puede ser cualitativa, cuantitativa, o una combinación de ambas y no debe necesariamente presentar una distribución normal (Esper Angillieri, 2012). El análisis se basa en las variables que son significativas, excluyendo aquellas que no influyen significativamente en la probabilidad de ocurrencia de los eventos, proporcionando resultados más precisos. Evalúa la importancia de las variables significativas asignándoles un peso. A su vez es un método práctico y fácil de aplicar en cuanto la proceso estadístico. El modelo obtenido se puede extrapolar a otras áreas semejantes sin necesidad de relevar y obtener un inventario inicial.

En el trabajo de Nandi *et al* (2009) se hace referencia a la regresión logística como una técnica innovadora y lógica que permite asignar valores de ponderación a los factores de inestabilidad más significativos, y excluir los factores que tienen un efecto menor o nulo en la actividad de deslizamientos, de esta manera se puede perfeccionar el método de análisis bivariado.

7.5.3. Ajuste del Modelo SINMAP

Los parámetros empleados por el modelo con sus respectivos valores por defecto se pueden observar en la tabla 26.

Tabla 26: Valores de los parámetros por defecto empleados en el análisis.

Parámetro	Valor	Unidades
$T_{(transmisividad)}/R_{(recarga)}$ (límite inferior)	2000	Metros
$T_{(transmisividad)}/R_{(recarga)}$ (límite superior)	3000	Metros
Dimensiones de cohesión (límite inferior)	0	N/m ²
Dimensiones de cohesión (límite superior)	0,25	N/m ²
Ángulo de fricción del suelo límite inferior	30°	Grados
Ángulo de fricción del suelo límite superior	45°	Grados
SA	10	porcentaje

En los resultados estadísticos mostrados en la tabla 27 se observa que el 51% del área es clasificada como baja inestabilidad, que corresponden 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%.

En la figura 48 se observa el mapa de susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos para el Parque Provincial Aconcagua resultado de la aplicación del modelo SINMAP.

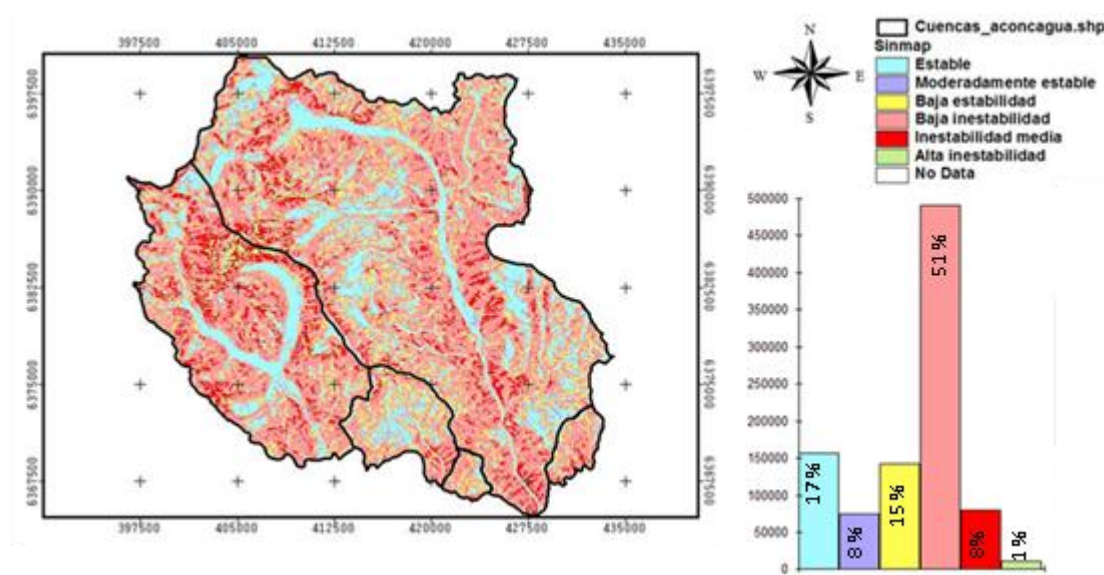


Figura 48: Mapa de susceptibilidad para el Parque Aconcagua obtenido mediante la aplicación del modelo SINMAP. Histograma con los porcentajes de áreas para cada categoría de estabilidad.

Tabla 27: Estadísticas resumen de la aplicación de SINMAP.

	Clases de Susceptibilidad						Total
	Estable	Moderadamente estable	Baja estabilidad	Baja inestabilidad	Inestabilidad media	Alta inestabilidad	
Área (Km ²)	150,49	69,59	127,87	441,03	71,33	9,57	869,88
% de Región	17,3	8	14,7	50,7	8,2	1,1	100
Nº flujos	58	46	96	501	62	3	766
% de flujos	7,57	6,01	12,53	65,40	8,09	0,39	100
Densidad (Nº flujos/Km ²)	0,38	0,66	0,75	1,14	0,87	0,31	0,88

En la figura 49 se presenta el gráfico que relaciona la pendiente y el área de contribución. En la parte interna de éste son representadas las curvas con los límites de índice de estabilidad, el grado de saturación y los puntos del inventario de deslizamiento. Este gráfico nos permite visualizar lo anterior mencionado ya que se observa un agrupamiento de los flujos en la región con índice de estabilidad entre 0,5 y 1, es decir en la categoría “baja inestabilidad”.

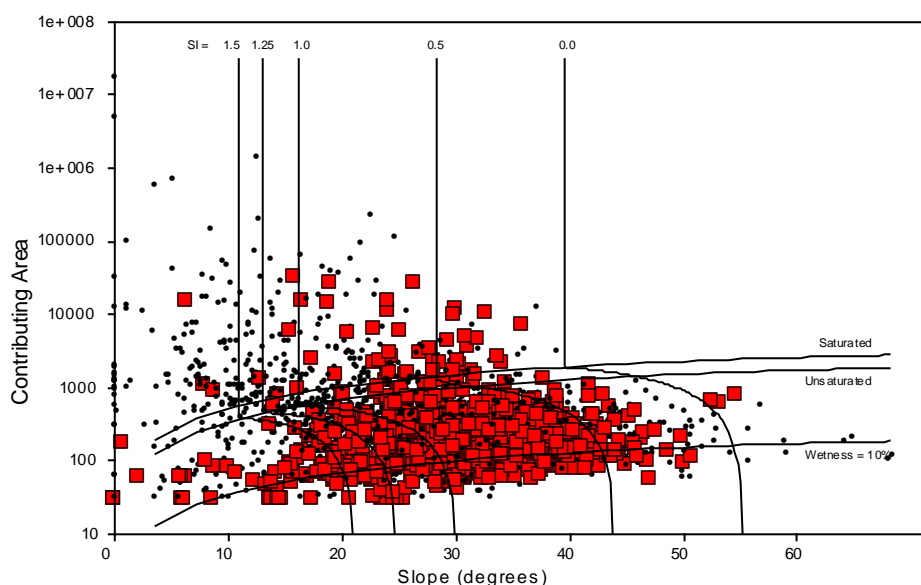


Figura 49: Gráfico de área de contribución en función de la pendiente

Los resultados obtenidos a través del modelo de base física SINMAP pueden ser considerados buenos, ya que 76% de los flujos empleados en el proceso de validación espacial de los resultados son clasificados en las tres categorías superiores, con índice de estabilidad menor a uno (Baja inestabilidad= 69% , inestabilidad media= 6% y alta inestabilidad= 1%).

En la tabla 28 se presentan los resultados de la validación espacial de SINMAP. Se observa la clasificación de los flujos en las distintas categorías como resultado de la superposición espacial del mapa de susceptibilidad con el mapa inventario constituido por los eventos que no han sido utilizados en el proceso de obtención de los resultados.

Tabla 28: Clasificación de flujos de detritos empleados en el proceso de validación por el modelo SINMAP.

	Clases de Susceptibilidad						Total
	Estable	Moderadamente estable	Baja estabilidad	Baja inestabilidad	Inestabilidad media	Alta inestabilidad	
Nº flujos	9	6	23	108	10	1	157
% de flujos	5,7	3,8	14,6	68,8	6,4	0,6	100
Densidad (Nº flujos/Km2)	0,06	0,09	0,18	0,24	0,14	0,10	0,18

Los modelos de base física son ampliamente utilizados para evaluar la susceptibilidad a flujos de detritos (Montgomery y Dietrich, 1994; Wu y Sidle, 1995; Burton y Bathurst, 1998; Crosta y Frattini, 2003 citado en Carrara, 2007).

Este modelo ha sido aplicado por diversos autores para evaluar susceptibilidad a deslizamientos, podemos mencionar por ejemplo a Terhorst *et al.* (2009) que lo aplica en un área de asentamiento de Jura de Suabia, Alemania. Deb *et al.* (2009) lo aplica para evaluar la susceptibilidad a deslizamientos en cuencas propensas en las zonas del sur de Oahu, Hawaii, EE.UU. Aquí se resaltó un problema crítico de la isla, ya que los resultados arrojaron que alrededor del 55% del área de estudio se predijo como muy inestable. López *et al.* (2007) quienes aplican SINMAP para obtener un mapa de índice de estabilidad en la región de la Serra de Cubatão y en la Sierra del mar Paulista, São Paulo, Brasil. Redin Vestena, (2010) emplea el modelo SINMAP para mapear la susceptibilidad a deslizamientos en la cuenca hidrográfica del Río Caté, Brasil.

Cereceda Quintanilla (2006) dice que los modelos deterministas sólo pueden ser aplicados cuando las condiciones geomorfológicas y geológicas son bastante homogéneas en toda el área de estudio. En este trabajo en la aplicación de SINMAP no se calibraron los parámetros vinculados a las propiedades mecánicas e hidráulicas del suelo por subzonas. Según Carrara (2007) 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. Con excepción de la morfología de la pendiente, de hecho, las variables físicas que controlan la distribución espacial de los deslizamientos 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 suelo, por lo tanto es difícil

conseguir la información para realizar las calibraciones del modelo ya que se necesitarían costosos ensayos de campo.

En el trabajo de Lopez *et al.* (2007) se aplica el modelo SINMAP en la cuenca del Río da Onça en la región de la Serra de Cubatão, SP. En este estudio se simuló con parámetros constantes y posteriormente con parámetros variables en función de las tres litologías presentes en el área. Obtuvieron un incremento en un 13% de cicatrices del inventario en la categoría baja inestabilidad y una reducción de 4% en la categoría de inestable, estos resultados se encontraron más realistas.

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. Por ejemplo en el trabajo de Muñoz-Jauregui *et al.* (2012) SINMAP es empleado para analizar la inestabilidad por pendientes y posteriormente se normalizan los valores obtenidos para analizarlos en conjunto con diez factores en forma de capas temáticas mediante un análisis multicriterio.

7.5.4. Comparación de los distintos modelos y validaciones

En general, los métodos estadísticos y físicos, han permitido definir umbrales, los cuales son definidos como el mínimo o máximo nivel crítico de alguna cantidad necesaria para que un proceso ocurra (Reichembach *et al.*, 1998 citado en Aristizábal *et al.*, 2010). Un campo importante de aplicación de estos modelos para la predicción de movimientos en masa detonados por lluvias son los sistemas de alerta temprana que minimicen la pérdida de vidas humanas e infraestructura (IEWP, 2005; Guzzetti *et al.*, 2005 citado en Aristizábal *et al.*, 2010).

Los mapas de susceptibilidad generados han sido clasificados en seis categorías: estable, moderadamente estable, baja estabilidad, baja inestabilidad, inestabilidad media y alta inestabilidad. Las tres primeras categorías son consideradas de mayor estabilidad y las tres últimas las de mayor inestabilidad. En la tabla 29 se presentan a modo de resumen los porcentajes de áreas clasificadas en las categorías de mayor y menor estabilidad por los tres modelos aplicados.

Tabla 29: Porcentaje de área clasificada en las categorías de mayor y menor estabilidad por los tres modelos aplicados.

Modelo	Área (%) clasificada en las categorías de mayor estabilidad	Área (%) clasificada en las categorías de mayor inestabilidad
Wi (Van Westen, 1997)	49	51
Regresión logística	50	50
SINMAP	40	60

El modelo SINMAP determina un escenario más pesimista ya que clasifica mayor área en las categorías inestables en comparación con los otros dos modelos que clasifican la mitad de la superficie en las de menor estabilidad y la otra mitad en las de mayor estabilidad.

Estos mapas fueron validados espacialmente a partir de la comparación entre éstos y la muestra de puntos del inventario de flujos de detritos seleccionados aleatoriamente y que no fueron utilizados en la confección de dichos mapas. En los resultados de esta validación se observa que en general los tres modelos tuvieron un buen desempeño ya que SINMAP clasificó el 76% de los flujos en las categorías de mayor inestabilidad, mientras que los modelos de regresión logística y el Wi de Van Westen clasificaron el 80% de los eventos en las categorías de mayor inestabilidad (Tabla 30).

Tabla 30: Porcentaje de flujos de detritos clasificados en las distintas categorías de estabilidad en el proceso de validación de los distintos modelos.

Modelos	Clases de Susceptibilidad					
	Estable	Moderadamente estable	Baja estabilidad	Baja inestabilidad	Inestabilidad media	Alta inestabilidad
Wi	0	1,9	17,8	45,2	26,1	8,9
	$\Sigma=19,7$			$\Sigma=80,3$		
Regr. Logística	0,6	4,5	14,6	33,8	42,7	3,8
	$\Sigma=19,7$			$\Sigma=80,3$		
SINMAP	5,7	3,8	14,6	68,8	6,4	0,6
	$\Sigma=24$			$\Sigma=76$		

Si bien en el proceso de validación se obtienen buenos resultados para SINMAP, al analizar el mapa en comparación con los obtenidos a partir de los demás modelos, se observa que en la zona noroeste del área, SINMAP genera mayoritariamente valores de alta inestabilidad cuando, según los otros dos modelos son zonas de menor susceptibilidad, debido principalmente a la litología (Complejo Volcánico Aconcagua). La baja presencia de flujos en esa zona confirma que las predicciones de los modelos de van Westen y de regresión logística son adecuadas. Es por tal motivo que, en el caso de utilizar SINMAP, se aconseja, si es posible, determinar las subzonas y sus correspondientes parámetros de calibración.

En el trabajo de Carrara *et al.* (2007) se concluyó que los modelos de base física todavía no son adecuados para la evaluación de la susceptibilidad regional de flujos de detritos en las zonas de los Alpes. Esto se debió a que el modelo aplicado presentó un bajo potencial de predicción y una baja capacidad para describir la distribución espacial de las zonas de origen de flujos de detritos. Estos resultados pueden deberse en primer lugar a la variedad de los procesos físicos responsables de la iniciación del flujo de detritos, que sólo se tiene

parcialmente en cuenta en el modelo. En segundo lugar, los parámetros geométricos y físico-mecánicos del suelo requeridos por los modelos son en gran medida desconocidos o inciertos.

En este estudio los resultados de 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 nuestro caso y según el análisis de regresión logística los factores que más afectan en orden decreciente son: la pendiente, la orientación, la altura, la vegetación y por último, las litologías “Complejos Volcánico Aconcagua” y “Depósitos aluviales”.

Si comparamos la zonificación obtenida en los mapas a través de los métodos estadísticos con las descripciones de [Moreiras \(2008\)](#) para el área de estudio, se observa que la zona de Los Grises, que es descrita por la autora como una zona de conos aluviales muy activos donde se encauzan flujos de detritos con recurrencia anual, es clasificada como baja a media inestabilidad en el modelo de regresión logística y de baja estabilidad a baja inestabilidad por el Wi. Con respecto a la zona de Playa Ancha, [Moreiras \(2008\)](#) describe que la actividad de flujos de detritos disminuye en este sector. En los dos modelos estadísticos aplicados en este estudio se observa que ésta zona es clasificada en las tres categorías de mayor estabilidad. [Moreiras \(2008\)](#) describe también que a partir de la piedra de Ibáñez, comienzan nuevamente los abanicos aluviales asociados a flujos de detritos hasta la Cuesta Brava, incrementando en esta dirección la violencia y actividad de éstos flujos. Esto último no se ve tan bien reflejado en los mapas obtenidos por los análisis estadísticos, ya que toda esa zona es clasificada en las categorías más estables.

A lo largo del río Horcones Inferior existen conos aluviales coalescentes donde se generan y encauzan los flujos de detritos que alimentan el glaciar Horcones inferior. Estas geoformas están mejor desarrolladas en la ladera oriental del valle, por donde se encuentra la senda a Plaza Francia. En la ladera occidental, en cambio, predominan mayormente los glaciares de escombros y lóbulos de soli-geliflución. Sin embargo, un flujo de detritos proveniente de ésta margen se ha depositado y aún se conserva sobre el glaciar reconstituido de Horcones Inferior. En el fondo del valle los flujos de detritos descargan directamente sobre el glaciar o encima de los depósitos morénicos ([Moreiras, 2008](#)). Estas observaciones se ven mejor reflejadas en el modelo de regresión logística, donde las laderas del valle quedan zonificadas en las categorías de baja inestabilidad e inestabilidad media. En cambio el modelo Wi establece mayor superficie en las categorías de baja estabilidad.

Con respecto a la quebrada del Río de Las Vacas, en el inventario de [Randis \(2012\)](#) se identificaron numerosos flujos principalmente en las laderas occidentales del valle. Esto queda muy bien reflejado en la zonificación obtenida mediante el modelo logístico ya que clasifica estas laderas mayoritariamente en la categoría de inestabilidad media con algunos sectores de inestabilidad alta. Con respecto a la ladera oriental, el modelo la zonifica mayoritariamente como baja inestabilidad y algunos sectores como inestabilidad media. La zona de ingreso a la quebrada queda clasificada como inestabilidad media y alta en algunos sectores, resaltando la

mayor susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos en esa zona. El modelo W_i para la quebrada del Vacas clasifica la ladera oriental principalmente como baja inestabilidad y la occidental como baja y media inestabilidad.

Del análisis de los mapas de susceptibilidad obtenidos por los modelos estadísticos puede observarse que los campamentos Berlín, Nido de Cóndores y Plaza de Mulas se encuentran en zonas clasificadas como de mayor estabilidad en lo que respecta a flujos de detritos. Esto confirma lo dicho por [Moreiras \(2008\)](#) que nos dice que la localización actual del campamento de Plaza de Mulas es un sitio poco susceptible a ser afectado por procesos gravitacionales tales como caídas y flujos de detritos.

El sitio donde se ubica el campamento Plaza Francia es clasificado por los modelos en las categorías de mayor estabilidad. Sin embargo sus alrededores son clasificados por el modelo de regresión logística en las clases inestabilidad media y baja inestabilidad. En la zona se observan trayectorias de flujos de detritos.

El sitio donde se encuentra emplazado el campamento Confluencia si bien es clasificado en las categorías de mayor estabilidad, las zonas de los alrededores son clasificadas en las de mayor inestabilidad, por lo tanto podrían ocurrir flujos que generen impactos directos o indirectos en el campamento en función de las trayectorias de los eventos. [Moreiras \(2008\)](#) dice que 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. La zona del campamento Horcones y sus alrededores es clasificada en las categorías de mayor inestabilidad.

Con respecto a los campamentos de la quebrada del Río de Las Vacas, Plaza Argentina queda clasificada en las categorías de mayor estabilidad, Casa de Piedra en las de mayor inestabilidad y por último los alrededores de Pampa de Leñas quedan clasificados en las categorías de mayor inestabilidad.

Los flujos 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 ([Moreiras, 2009](#)). Es por esto que es importante realizar análisis sobre las posibles trayectorias de los eventos que complementen los resultados obtenidos en este estudio.

En función de los análisis realizados podemos decir que el análisis bivariado llevado a cabo (W_i), permite conocer las clases de cada variable más susceptible a ser afectada por flujos de detritos en función de los valores de densidad normalizada de cada clase. Sin embargo, no determina la importancia relativa de cada variable en la valoración de la susceptibilidad, desconociendo de esta manera el carácter predictivo de cada variable. En cambio, en la

regresión logística los pesos de los factores condicionantes indican la contribución relativa de cada uno de estos factores a la susceptibilidad.

Podemos concluir, en función de todo lo anteriormente mencionado que el modelo de regresión logística es el más adecuado para el análisis de la susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos en el área de estudio, con la posibilidad de extrapolarlo a otras áreas de características similares. Se recomienda la utilización del mapa obtenido a través de este método para la planificación y el análisis relacionado con la gestión de riesgos.

8. Conclusiones y contribuciones al Parque Provincial Aconcagua

El área de estudio tiene características favorables para la ocurrencia de flujos de detritos. Estos eventos representan una gran peligrosidad en la región habiendo causado daños en el área protegida.

En el valle de Horcones los flujos de detritos constituyen la mayoría de los procesos identificados por [Moreiras \(2008\)](#). En el valle del Río de Las Vacas se reconocen numerosos flujos de detritos activos de importantes dimensiones. Algunos eventos extraordinarios han represado el cauce de los ríos en varias ocasiones.

Estos antecedentes alertan sobre la peligrosidad natural de la región y la necesidad de realizar análisis de riesgo que nos permitan zonificar la reserva. A su vez, la peligrosidad asociada a estos eventos se ha visto concretada en hechos como arrastre de mulas, endicamientos 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.

La zonificación obtenida en este estudio permitió realizar un reconocimiento preliminar de las áreas con diferentes grados de susceptibilidad a generar flujos de detritos; permitió además definir zonas críticas, que posteriormente han de ser objeto de estudios geotécnicos detallados en el campo y laboratorio.

En este estudio se han aplicado los métodos estadísticos W_i (Van Westen, 1997) y regresión logística, y el modelo de base física SINMAP para generar mapas de susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos. Se ha utilizado de base el mapa inventario de Randis (2012), el cual fue revisado y a partir de éste se digitalizaron las zonas de iniciación de los eventos. En total han sido mapeadas 923 zonas de iniciación de flujos de detritos, de ellas 766 fueron utilizadas en el cálculo de los mapas de susceptibilidad, mientras que las 157 restantes fueron utilizadas en la validación espacial de dichos mapas.

Estos modelos contribuyen a la determinación de zonas potencialmente inestables y a la predicción de futuros escenarios para el diseño de sistemas de alerta temprana que minimicen la pérdida de vidas humanas e infraestructura. En el Parque Provincial Aconcagua principalmente en los meses de temporada (Noviembre a Marzo) existe un alto grado de exposición al tener una gran cantidad de población (transitoria y permanente). Debido a la

creciente demanda turística en el Parque Provincial Aconcagua estos sistemas de alerta junto con el ordenamiento territorial del área son imprescindibles. Con la información generada en esta investigación se aporta una herramienta más para la toma de decisiones en cuanto a la ubicación de infraestructura vital (campamentos, helipuertos, puentes) en el área protegida así como también la ubicación de los senderos de tránsito.

La susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos está determinada por numerosos factores que influyen en distintos grados. Según lo analizado con la metodología Van Westen (1997) podemos decir que las clases de variables más susceptibles a la ocurrencia de flujos son para el caso de las litologías, las formaciones la Manga, Granito Cruz de Caña y Alto Tupungato. Para la variable pendientes las más susceptibles son las fuertes (16° - 35°) y muy fuertes (35° - 55°). Con respecto a la orientación las N y N-E son más susceptibles y por último, las alturas que van desde los 2.900 msnm. a 4.400 msnm. Estas clases son las que presentaron mayor densidad de flujos de detritos pero no necesariamente las que se encontraron más representadas en el área de estudio.

En función del análisis de regresión logística llevado a cabo en el presente estudio, los factores que son significativos para la susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos en el área del Parque Provincial Aconcagua son la pendiente, la orientación, la altura, la vegetación y las litologías “Complejos Volcánico Aconcagua” y “Depósitos aluviales”.

En cuanto a las metodologías aplicadas en este estudio se concluye que 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 ya que se incluyen las variables que son significativas y la contribución relativa de los factores.

Este estudio 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. Es fundamental mantener actualizados y revisar constantemente los mapas inventarios ya que estos constituyen la herramienta básica más importante en los estudios de peligrosidad.

Este estudio complementa el trabajo de [Randis \(2012\)](#) al analizar conjuntamente la distribución de los flujos de detritos con la distribución espacial de los factores condicionantes obteniendo así la susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos para el área del parque Aconcagua.

El mapa de susceptibilidad muestra dónde hay o no, condiciones para que puedan ocurrir flujos de detritos. La probabilidad de ocurrencia de un factor detonante como una lluvia o un sismo no se considera en un análisis de susceptibilidad. Por lo tanto sería enriquecedor y necesario realizar estudios que analicen la peligrosidad a la ocurrencia de estos eventos incluyendo el factor temporal que incorporen otros factores como las lluvias y las precipitaciones de nieve, y más detallada información sobre la hidrología y la hidrogeología. En este caso, el estudio de [Lisboa \(2011\)](#) sería una base fundamental. Aquí se destaca, en función de los datos históricos relevados, que los inviernos con mayores precipitaciones níveas, que estarían asociados a las fases cálidas del ENSO (Niño), derivarían en veranos con mayor ocurrencia de procesos de remoción en masa. Es fundamental que se siga trabajando y generando mayor información al respecto para que se puedan tomar medidas preventivas en los momentos oportunos y realizar una fundamentada zonificación del parque considerando los sitios de mayor riesgo.

Estos estudios representan una herramienta para el manejo de las amenazas que implican los flujos de detritos en la zona del PPA ya que sirve para la prevención y mitigación de sus impactos mediante una estrategia de planificación del uso del territorio.

9. Bibliografía

- 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* (2012) 9:93–106.
- Ambrosetti, J.A.; Del Vitto L.A.; Roig F.A.** 1986. La vegetación del Paso de Uspallata, provincia de Mendoza, Argentina. *Beitrage. Veroff. Geobot. Institut. E.T.H. Stiftung Rübel*, 91: 141 180. Zurich.
- Aristizábal E., Marinez, H., & Vélez J. I.** 2010 Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 34 (131): 209-227. ISSN 0370-3908.
- Aronica, A., Biondi, G., Brigandì, G., Cascone, E., Lanza S.** 2012. Assessment and mapping of debris-flow risk in a small catchment in eastern Sicily through integrated numerical simulations and GIS Giovanni Randazzo. *Physics and Chemistry of the Earth* 49 (2012) 52–63.
- Ayala, F.J., Elízaga, E., González de Vallejo, L.I., Durán, J.J., Beltrán de Heredia, F., Oliveros, M.A., Carbó, A., Guillaumont, M.L. y Capote, R.** 1987. Impacto económico y social de los riesgos geológicos en España. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- Ayala-Carcedo, F.J.** 2002. Una reflexión sobre los mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera, su naturaleza, funciones, problemática y límites. En: F.J. Ayala-Carcedo y J. Corominas, (eds.). *Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladra con técnicas SIG. Fundamentos y Aplicaciones en España*, Instituto Geológico y Minero de España, 7-20.
- Bastías H., Tello G.E., Perucca L.P. y Paredes J.D.,** 1993. Peligro sísmico y neotectónica. XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Explotación de Hidrocarburos (Mendoza). *Geología y Recursos Naturales de Mendoza*. Victor Ramos (Ed.). Relatorio 1, (19): 645-658.
- Beverage, J.P., and Culbertson, J.K.,** 1964. Hyperconcentrations of suspended sediment: American Society of Civil Engineers Proceedings, *Journal of the Hydraulics Division*, v. 90, no. HY6, p. 117-128.
- Bonachea Pico, J.** 2006. Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debidos a procesos geomorfológicos. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria.
- Bouyoucos, G.J.** 1962. "Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils". *Agrn. J.*54:464-465.
- Brabb E.E., Pampeyan E.H. y Bonilla M.G.**1972. Landslide susceptibility in San Mateo County, California: U.S. Geological Survey Miscellaneous Field Studies Map MF-360, scale 1:62,500.
- Brufau, P., García-Navarro, P., Ghilardi, P., Natale, L., Savi, F.** 2000. 1D Mathematical modelling of debris flow. *Journal de Recherches Hydrauliques*, Vol. 38, N° 6.

- Cabrera A.L.** 1976. Regiones fitogeográficas argentinas. En Kugler WF (Ed.) Enciclopedia argentina de agricultura y jardinería. Tomo 2. 2a edición. Acme. Buenos Aires. Argentina. Fascículo 1. pp. 1-85.
- Campbell R.H. y Bernknopf R.L.** 1993. Time-dependent landslide probability mapping: American Society of Civil Engineers, Proceedings of the 1993 Conference, Hydraulic Engineering '93; July, 1993, San Francisco, pp. 1902-1907.
- Capitanelli R.** 1972. "La quebrada de Matienzo. Modelado glaciar y periglacial". Departamento de geografía, Facultad de Filosofía y Letras. U.N.T.
- Carrara A, Crosta G, Frattini P.** 2008. Comparing models of debris-flow susceptibility in the alpine environment. *Geomorphology* 94: 353–378.
- Cereceda Quintanilla, I.** 2006. Uso de los SIG en el análisis de susceptibilidad y predicción de deslizamientos" Compendio de Trabajos de Investigación CNDG – Biblioteca Instituto Geofísico del Perú. V. 7 p. 191 – 202.
- Chauhan, S., Sharma, M., Arora M. K.** 2010. Landslide susceptibility zonation of the Chamoli region, Garhwal Himalayas, using logistic regression model. *Landslides* (2010) 7:411–423.
- Compagnucci R.H., Agosta E.A. y Vargas W.M.** 2002. Climatic change and quasioscillations in central-west Argentina summer precipitation: main features and coherent behaviour with southern African region. *Climate Dynamics* 18: 421-435.
- 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.
- Costa C., Machette M., Dart R., Bastias H., Paredes J., Perucca L., Tello G., Haller K.** 2000. Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Argentina. U.S. Geological Survey Open-File Report. 00-0108, 75 p.
- Costa, J.E. & Fleisher, P.J.** 1984. Physical Geomorphology of Debris Flows. *Developments and applications of geomorphology* 268–317.
- Costa, J.E.** 1988. Rheologic, Geomorphic, and Sedimentologic Differentiation of Water Floods, Hyperconcentrated Flows, and Debris Flows. *Flood Geomorphology*. John Wiley & Sons New York. 1988. p 113-122.
- 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, pp 36–75.
- Deb, S., El-Kadi, A.** 2009. Susceptibility assessment of shallow landslides on Oahu, Hawaii, under extreme-rainfall events. *Geomorphology* 108, 219–233.
- 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. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Dietrich, W., Real de Asua, R., Bruce Orr, J., Trso, M.** 1998. A validation study of the shallow slope stability model, SHALSTAB, in forested lands of Northern California. Universidad de California.

- 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* (2006) 51: 241–256.
- Durán, V., Cortegoso, V. y Lucero, G.** 2012. Estudios Arqueológicos sobre sus ocupantes prehispánicos. *Revista El ojo del cóndor*, IGN, 1:19-21.
- 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.
- Esper Angillieri, M.Y.** 2012. Análisis de la vulnerabilidad por flujos en masa en la provincia de San Juan (Oeste de Argentina). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 25 (3-4): 145-156.
- Espizúa, L.E., J. D. Bengochea & C. J. Aguado**, 1993. Mapa de riesgo de remoción en masa en el valle del río Mendoza. XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos. *Actas* 6: 323-332.
- Gomes, R. A. T., Guimaraes R. F., Carvalho, O. A., Fernandes, N. F., Vargas, E. A., Martins, E. S.** 2008. Identification of the affected areas by mass movement through a physically based model of landslide hazard combined with an empirical model of debris flow. *Nat Hazards*, 45:197–209 DOI 10.1007/s11069-007-9160-z.
- Gómez, H., Guerra, F., Gonzales, J.** 2003. Los sistemas de Información geográfica (SIGs) en la detección de áreas inestables. *Geoenseñanza*. Vol.8-2003 (1). p. 33-48.
- Gutierrez Elorsa, M.**, 2008. "Geomorfología". Pearson Educación, S.A. , Madrid. p. 304, 319, 518, 526, 537, 544.
- Hutchinson J. N.** 1968. Mass Movement. In: *The Encyclopedia of Geomorphology* (Fairbridge, R.W., ed.), Reinhold Book Corp., New York, pp. 688–696.
- Hutter, K, Svendsen B, Rickenmann, D.** 1996. Debris flow modeling: A review. *Continuum Mech. Thermodyn.* 8: 1-35.
- Irigaray, C., Lamas, F., Hamdouni, R., Fernández, T. y Chacón, J.** 2000. The importance of the Precipitation and the Susceptibility of the Slopes for the Triggering of Landslides Along the Roads. *Natural Hazards*, 21: 65-81.
- Jakob, M.** 2005. A size classification for debris flows. *Engineering Geology* 79: 151–161.
- Jason N. Goetz, J., Guthrie, R., Brenning, A.** 2011. Integrating physical and empirical landslide susceptibility models using generalized additive models". *Geomorphology* 129 (2011) 376–386.
- Koeppen W.** 1931. *Grundriss der Klimakunde*, Walter de Gruyter Co. 12. 388 p. Berlin.
- Kutílek M.; D.R. Nielsen.** 1994. *Soil Hydrology*. Catena Verlag. p. 87-120.
- Lauro C.** 2010. Estudio del origen y morfología de los paleo-represamientos de la quebrada Benjamín Matienzo, naciente del Río de Las Cuevas, Mendoza. Tesis de grado. Ingeniería en Recursos Naturales Renovables. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo.

- Lavell, A.** 2003. La gestión local del riesgo. Nociones y precisiones en torno al concepto y la práctica. Programa Regional para la gestión del Riesgo en América Central. CEPREDENAC-PNUD.
- Lee, S., Pradhan, B.** 2006. Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides* (2007) 4:33–41.
- Li, J., Yuan J.M., Bi, C., Luo, D.F.** 1983. The main features of the mudflow in Jiang-jia Ravine. *Z Geomorphology*. 27:325–342.
- Lisboa, M S.** 2011. Análisis de la influencia de parámetros meteorológicos en la ocurrencia de procesos de remoción en masa en el Parque Provincial Aconcagua. Tesis de grado. Ingeniería en Recursos Naturales Renovables. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo (unpublished).
- Lopez, E.** 2006. Modelación espacial dinámica aplicada al estudio de los movimientos en masa en una región de la Sierra del mar Paulista. En escala de 1:10.000. Tesis de doctorado en Geociencias y Medio Ambiente. Instituto de Geociencias y ciencias exactas. Universidad Estadual Paulista. Río Claro, San Pablo, Brasil.
- Lopez, 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". *Geociencias*, v. 26, n. 1, p. 83-95.
- Martínez Carretero, E. y E. Méndez.** 1992. La vegetación de la vertiente oriental de la Cordillera Real, Mendoza-Argentina. *Multequina* 1: 99-106.
- Meisina, C.; Scarabelli, S.** 2007. A comparative analysis of terrain stability models for predicting shallow landslides in colluvial soils". *Geomorphology* 87, 207–223.
- Melelli, L. y Taramelli, A.** 2004. An example of debris-flowshazard modeling using GIS. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4: 347–358.
- Méndez, E., Martínez Carretero E., Peralta I.** 2006. La Vegetación del Parque Provincial Aconcagua (Altos Andes centrales de Mendoza, Argentina). *Bol. Soc. Argent. Bot.* 41 (1-2): 41-69
- Montgomery, D.R., Dietrich, W.E.** 1994. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research* 30, 83–92.
- Mora R.** 2004. Evaluación de la susceptibilidad al deslizamiento del Cantón de San José, provincia de San José, Costa Rica. Servicios Especializados de Laboratorio de Suelos y Rocas, FUNDEVI 0960, Sección Geotecnia e Hidrogeología, Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica.
- Moreiras S.M.** 2004(a). Landslide incidence zonation in the Rio Mendoza valley, Mendoza province, Argentina. *Earth Surface Processes and Landforms* 29:255–266.
- Moreiras S.M.** 2004(b). Zonificación de peligrosidad y riesgo de procesos de remoción en masa en el valle del Río Mendoza. PhD thesis. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de San Juan (unpublished).
- Moreiras S.M.** 2006. Frequency of debris flows and rockfall along the Mendoza river valley (Central Andes), Argentina: Associated risk and future scenario. Special Issue Holocene Environmental Catastrophes in South America. *Quaternary International* 158 (2006): 110-121.

- Moreiras S.M., Lenzano M.G. y 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.
- 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.
- Moreiras S.M., Olmedo V.E., Diaz A.F.** 2007. Informe 2: Zonificación de peligrosidad. Línea Rodados. Sistema de Control y Manejo Vialidad Invernal de la ruta Nacional 7. Proyecto BID – DNV.
- 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.
- 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.
- Moreiras, S.M.** 2011. Grandes colapsos holocénicos en el parque provincial Aconcagua. XVIII Congreso Geológico Argentino. Neuquén.
- Moreiras, SM.** 2008. Inventario de procesos de remoción en masa: peligrosidad y riesgo asociado. Informe técnico preliminar Recursos Naturales de la Provincia de Mendoza.
- Muñiz-Jauregui, J.A., Hernández-Madrigal, V.M.** 2012. Zonificación de procesos de remoción en masa en Puerto Vallarta, Jalisco, mediante combinación de análisis multicriterio y método heurístico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 29, núm. 1, 2012, p. 103-114.
- Nandi, A Shakoob, A.** 2009. A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses. *Engineering Geology* 110 (2009) 11–20.
- Oliveira Dias, L. S.** 2006. Identificação de áreas suscetíveis a deslizamento de terra utilizando sistema de informações geográficas. Universidad Federal de Bahia. Escuela Politécnica. Maestría en Ingeniería Ambiental Urbana.
- Olivera R., Lardelli U.,** 2009. Aves de Aconcagua y Puente del Inca, Mendoza, Argentina. Publicaciones especiales El Arunco Nro. 2, Ediciones DE LA TRAVESÍA. Pag 9 y 10.
- Pack, R.T., Tarboton, D.G., Goodwin, C.N.** SINMAP a stability index approach to terrain stability hazard mapping” SINMAP User’s Manual.
- Pack, R.T.; Tarboton, D.G.; Goodwin C.N.** 1998. The SINMAP Approach to Terrain Stability Mapping. Documento presentado a 8 ° Congreso de la Asociación Internacional de Ingeniería Geológica, Vancouver, British. Columbia, Canadá 21 a 25 septiembre.
- 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, February 19-22, Vancouver, British Columbia.
- Pantha, B. R., Yatabe, R., Bhandary N.P.** 2008. GIS-based landslide susceptibility zonation for roadside slope repair and maintenance in the Himalayan region. *Episodes*, Vol. 31, No. 4
- Peralta P., Claps M. C.** 2001. Seasonal variation of the mountain phytoplankton in the arid Mendoza basin, Westcentral Argentina). *J. Freshw.*

- Perucca L., Moreiras S.M.** 2010. Liquefaction phenomena associated to historic earthquakes in San Juan and Mendoza provinces, Argentina. *Quaternary International* 158.
- Pierson, T.C.; Costa, J.E.** 1987. A rheologic classification of subaerial sediment-water flows: *Geological Society of America Reviews in Engineering Geology*, v. 7, p. 1-12.
- Polanski, J.** 1972. Descripción geológica de la Hoja 24 a-b-Cerro Tupungato, provincia de Mendoza. *Boletín de la Dirección Nacional de Geología y Minería* - n. 128
- 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.
- 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 (unpublished).
- Recursos Naturales.** 2009. Records y Estadísticas, Parque Provincial Aconcagua 2009. División Informática, Dirección de recursos naturales renovables, Secretaría de medio ambiente, Gobierno de Mendoza.
- 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.
- Scheidl, C.** 2009. Prediction of debris-flow mobility and deposition on torrential fans. PhD thesis. Institute of Mountain Risk Engineering. University of Natural Resources and Applied Life Sciences. Austria.
- Secretaría de Recursos Hídricos de la Nación.** 2004. Estadística Hidrológica, Río de las Cuevas y Río de las Vacas, Cuenca del Río Mendoza. <http://www.hidricosargentina.gov.ar/estad2004/principal.htm>
- Sowers G.F. y Royster D.L.** 1978. Field investigation. En: *Landslides- analysis and control*, Chapter 4, pp: 81-111. R.L.Schuster and R.J. Krizek (eds.). Washington, D.C.
- Suárez, A.M., Peraldo, G., Badilla, E., Obando, L.** 2009. Zonificación geomorfológica para la evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos en la cuenca del Río Viejo, Puriscal, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 41: 55-69.
- Suárez, J.** 2009. Deslizamientos. Vol. 1. Análisis Geotécnico. Universidad Industrial de Santander, UIS Facultad de Ingenierías Físico Mecánica Escuela de Ingeniería Civil. 588 p. Colombia.
- Terhorst, B., Kreja, R.** 2009. Slope stability modelling with SINMAP in a settlement area of the Swabian Alb. *Landslides* 6:309–319.
- UNISDR,** 2009. Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastres. Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas. Disponible en www.unisdr.org/publications o en www.preventionweb.net
- Van Asch, Th. W. J., Malet, J. P., Van Beek, L. P. H.** 2006. Influence of landslide geometry and kinematic deformation to describe the liquefaction of landslides: Some theoretical considerations. *Engineering Geology* 88: 59–69.

- Van Westen, C.J.** 1994. Deterministic landslide hazard zonation. ILWIS Applications Guide. Chapter 6. Pp:85-98. International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation (ITC). The Netherlands.
- Varnes D.J.** 1978. "Slope movement types and processes". En: R.L. Schuster and R.J. Krizek (Editors), Landslides: Analysis and Control. Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington D.C., Special Report 176: 11-33.
- Varnes, D.J.** 1984. Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. Natural Hazards. Nº 3. UNESCO, 63 p. Paris.
- Walkley, A. and Black, I.A.** 1934. An examination of the Degtjareff method for determining organic carbon in soils: Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. Soil Science, 63: 251-263.
- Wawer, R., Nowocień, E.** 2003. Application of SINMAP terrain stability model to Grodarz Stream Watershed. Electronic Journal of Polish Agricultural Universities. Volume 6. Issue 1.
- Zalazar, L., Aloy, G., Sorli, L., Brandi, S., and Barros, A.** 2007. Mapa de Vegetación del Parque Provincial Aconcagua. Mendoza. Instituto de Desarrollo Rural y Dirección de Recursos Naturales de Mendoza.
- Záruba Q. y Menci V.** 1982. Landslides and their control, First Ed. Elsevier, Amsterdam Netherlands, 324 págs.

ANEXOS

Tabla: Análisis Van Weten en función del mapa inventario de ejecución (total: 766 flujos)

Factor	Clase	Nº de flujos de detritos	%de flujos de detritos	Superficie (Km2)	Superficie (%)	Normalización	Wi
Litología	Formación la Manga	2	0.3	0.51	0.059	4.42	1.49
	Granito Cruz de Caña	26	3.4	10.23	1.183	2.89	1.06
	Formación Alto Tupungato	105	13.7	54.31	6.282	2.20	0.79
	Formación Vaca Muerta	31	4.1	21.32	2.466	1.65	0.50
	Conglomerado Santa María	128	16.8	87.15	10.082	1.67	0.51
	Formación Juncal	26	3.4	19.37	2.241	1.52	0.42
	Grupo Choiyoi	253	33.1	252.38	29.195	1.14	0.13
	Formación Agrio	33	4.3	35.59	4.117	1.05	0.05
	Formación Auquilco	11	1.4	14.1	1.631	0.89	-0.12
	Formación Diamante	55	7.2	69.04	7.987	0.90	-0.10
	Traquitas Puente de Inca	2	0.3	3.67	0.425	0.62	-0.48
	Depósitos aterrizados	0	0.0	1.29	0.149	0.00	---
	Formación Tordillo	15	2.0	29.45	3.407	0.58	-0.55
	Depósitos glaciarios	19	2.5	38.55	4.459	0.56	-0.58
	Depósitos aluviales	15	2.0	49.73	5.753	0.34	-1.07
	Complejo Volcánico Aconcagua	43	5.6	177.39	20.520	0.28	-1.29
Volcanitas Laguna Seca	0	0.0	0.38	0.044	0.00	---	
Pendiente	0-2	7	0.9	13.99	1.61	0.57	-0.57
	2-4	2	0.3	8.58	1.00	0.26	-1.33
	4-8	6	0.8	29.09	3.42	0.23	-1.45
	8-16	35	4.6	120.18	13.91	0.33	-1.11
	16-35	517	67.5	519.25	59.40	1.13	0.12
	35-55	199	26.0	171.04	19.77	1.32	0.28
	Mayor a 55	0	0.0	7.53	0.88	0.00	---
Altura	2400-2900	11	1.4	16.3	1.87	0.77	-0.27
	2900-3400	93	12.2	80.82	9.29	1.31	0.27
	3400-3900	209	27.4	197.55	22.71	1.20	0.18
	3900-4400	278	36.4	281.13	32.32	1.12	0.12
	4400-4900	137	17.9	196.26	22.57	0.79	-0.23
	4900-5400	36	4.7	73.78	8.48	0.55	-0.59
	5400-5900	0	0.0	15.13	1.74	0.00	---

	5900-6400	0	0.0	6.23	0.72	0.00	---
	6400-6900	0	0.0	2.55	0.29	0.00	---
Orientación	N	111	14.5	53.90	6.20	2.34	0.85
	NE	175	22.9	41.62	4.79	4.77	1.56
	E	149	19.5	125.52	14.43	1.35	0.30
	SE	76	9.9	139.77	16.07	0.62	-0.48
	S	49	6.4	126.35	14.52	0.44	-0.82
	SO	79	10.3	114.32	13.14	0.78	-0.24
	O	76	9.9	141.85	16.31	0.61	-0.50
	NO	49	6.4	126.56	14.55	0.44	-0.82
Vegetación	Presencia	123	16.1	134.63	15.48	1.04	0.04
	Ausencia	640	83.9	735.25	84.52	0.99	-0.01

Tabla: regresión logística. Salida de software Infostat

Distribución: Binomial
Función de enlace: Logit

Variable dependiente: flujo
Codificar como éxito a valores mayores que la media
Número de observaciones: 1523
Observaciones faltantes: 7
Iteraciones: 6 (max=20)
Tolerancia: 1E-9 (0.000000000)

Parámetros	Est.	E.E.	O.R.	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
ALTURAS	-7.3E-04	1.3E-04	1.00	1.00		1.00		34.15		<0.0001
PENDIENTES	0.05	0.01	1.05	1.04		1.06		85.46		<0.0001
ORIENTACION	-2.6E-03	5.7E-04	1.00	1.00		1.00		21.66		<0.0001
LITOLOGIA_Comp_volcanico_A..	-1.67	0.20	0.19	0.13		0.28		71.07		<0.0001
LITOLOGIA_Depositos_aluvia..	-1.80	0.32	0.17	0.09		0.31		30.97		<0.0001
VEGETACION	-0.51	0.18	0.60	0.43		0.85		8.37		0.0038

	Valor	gl
Log Likelihood	-889.96	1516
Deviance	1779.93	1516
Escala (fijada)	1.00	