Tesis de Maestría. FACULTAD DE MATEMATICA ASTRONOMIA Y FISICA (FAMAF) ; UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA.

Zonación de susceptibilidad por procesos de remoción en masa en la cuenca del río Tartagal, Salta (Argentina).

Paola Cardozo.

Cita:

Paola Cardozo (2013). *Zonación de susceptibilidad por procesos de remoción en masa en la cuenca del río Tartagal, Salta (Argentina)* (Tesis de Maestría). FACULTAD DE MATEMATICA ASTRONOMIA Y FISICA (FAMAF) ; UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA.

Dirección estable: https://www.aacademica.org/paola.cardozo/22

ARK: https://n2t.net/ark:/13683/pxqH/rPx



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons.
Para ver una copia de esta licencia, visite
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es.

Acta Académica es un proyecto académico sin fines de lucro enmarcado en la iniciativa de acceso abierto*. Acta Académica fue creado para facilitar a investigadores de todo el mundo el compartir su producción académica. Para crear un perfil gratuitamente o acceder a otros trabajos visite: https://www.aacademica.org*.

Zonación de susceptibilidad por procesos de remoción en masa en la cuenca del río Tartagal, Salta (Argentina)

por Lic. Claudia Paola Cardozo

Presentado ante la Facultad de Matemática, Astronomía y Física
y el Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich
como parte de los requerimientos para la obtención del grado de

MAGISTER EN APLICACIONES ESPACIALES DE ALERTA Y RESPUESTA TEMPRANA A EMERGENCIAS

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA

Mayo de 2013

©IG - CONAE/UNC 2013

© FaMAF - UNC 2013

Director:
Dr. Guillermo Toyos
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Co-Director:
Lic. Valérie Baumann
Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR)

***Palabras Claves*:** Susceptibilidad por procesos de remoción en masa, Sensores Remotos, SIG, Tartagal.

Resumen

Se presenta el primer mapa de zonación de susceptibilidad por procesos de remoción en masa para la cuenca del río Tartagal (Salta, Argentina) usando técnicas de Sensores Remotos y un Sistema de Información Geográfica (SIG). La superficie afectada y el volumen del material removido durante el alud del 2009, fueron aproximadamente de 3 km^2 y 2 km^3, respectivamente. La magnitud del evento fue de 6.3. Los resultados revelan que el 15.07 % de la cuenca presentó susceptibilidad baja, mientras que el 22.45 % evidenció susceptibilidad moderada y el 62.48 % registró susceptibilidad alta. Tanto el análisis de susceptibilidad, como el mapa inventario y la topografía digital generados constituyen una línea de base, hasta el momento inexistente en el área de estudio y servirán para futuros estudios de peligrosidad y riesgo por procesos de remoción en masa. Asimismo, serán útiles como una herramienta de planeamiento y para la implementación de estrategias de mitigación y reducción del riesgo.

Abstract

This study presents the first susceptibility zonation map for mass movements for Tartagal River basin (Salta, Argentina) using Remote Sensing and Geographic Information System (GIS) techniques. The affected area, volume of material removed and magnitude of the event, were about 3 km^2, 2 km^3 and 6.3, respectively. The results revealed that 15.07 % of the River basin includes terrains with low susceptibility; and 22.45 % includes moderate susceptibility and a 62.48 % includes a high susceptibility. Susceptibility analysis, inventory map and digital topography, are a baseline for the study area and they will be useful for future hazard and risk assessments. They may also be used as a planning tool, and to implement mitigation strategies and risk reduction.

Agradecimientos

Mi sincero agradecimiento a CONAE y al Gobierno Italiano por haberme dado la oportunidad de continuar con mi capacitación y crecimiento profesional.

Al Mtro. Félix Menicocci por todo el apoyo y confianza brindados.

A todo el personal del CNR-IRPI de Perugia-Italia, en especial a Frida Clerici, Paola Reichenbach, Paola Salvati, Francesco Bucci, Massimo Guadaño, Salvatore Raia y Fausto Guzzetti por haberme ayudado en muchos sentidos a cumplir el objetivo.

A todo el personal de CONAE por el tiempo compartido.

Al Dr. Guillermo Toyos y Lic. Válerie Baumann por éste proyecto.

Al Dr. Ricardo Alonso por la lectura crítica de la tesis y recomendaciones brindadas.

Al Dr. José G. Viramonte y a todos los integrantes de la Fundación CAPACITAR del NOA por el préstamo de la camioneta para el viaje de campaña y todo el apoyo logístico brindado.

Al Dr. Carlos Peralta por la asistencia en la colección de puntos de control en el campo.

A la Secretaría de Ambiente de la Provincia de Salta por el préstamo del GPS Diferencial.

A Ernesto Lescivia por su amistad invaluable y su ayuda en la instalación de los softweares.

Con enorme gratitud en mi corazón a todos los amigos argentinos de Siena y Perugia, por haber estado junto a mí siempre, en especial a María Eugenia Cáceres, Fulvio Pupilli, Graciela y Daniel Cucciniello y Mercedes.

A todos los amigos de Argentina e Italia que rieron conmigo y también estuvieron apoyándome y dándome fuerzas en los momentos de duda, desconsuelo y soledad: Mariela Miño, Tito, Nicolás Ripani, Cecilia Aguirrre, Pilar Ibarbals, Teddy Fiorillo, Javier Moreno, Federico Alonso, Rocío Tupac, Elías López, Claudio Tablada, Massimo Petracca, Marco Giorgi, Frida Clerici y Silvia Ferri.

A mi madre, por ser mi compañera de viaje, de lucha y amiga. Porque sin ella éste y todos los demás proyectos de mi vida no serían posibles.

A mi padre, porque fue él quien incentivó en mí desde la niñez, el interés por la ciencia, el ambiente y la naturaleza.

Y principalmente agradezco a Dios, por haber sido brisa fresca en las horas de tribulación. Por ser mi pastor fiel, mi Salvador y por inundarme siempre con su gran Misericordia.

Resumen

Los procesos de remoción en masa son comunes en las Sierras Subandinas, en donde durante los últimos 50 años se han producido varios eventos que resultaron en numerosas muertes y pérdidas económicas en las comunidades que viven al pie de las mismas. Se presenta el primer mapa de zonación de susceptibilidad por procesos de remoción en masa para la cuenca del río Tartagal (Salta, Argentina) usando técnicas de Sensores Remotos y un Sistema de Información Geográfica (SIG). Para su elaboración, se usó un Modelo Digital de Elevaciones (DEM) de 12.5 m de resolución espacial para extraer los principales factores condicionantes que inciden en la ocurrencia de los movimientos de laderas: gradiente de pendientes y curvatura. La identificación y mapeo de los procesos de remoción en masa (inventario) del evento del año 2009, se obtuvo a partir de una clasificación supervisada (algoritmo de máxima verosimilitud) de una imagen SPOT-4 de 10 m de resolución espacial, adquirida inmediatamente después del evento. Los factores condicionantes, mapa inventario de procesos de remoción en masa y un mapa litológico, se utilizaron para construir un modelo de susceptibilidad por medio del método heurístico, en un SIG. La superficie afectada y el volumen del material removido durante el alud del 2009, fueron aproximadamente de 3 km^2 y 2 km^3, respectivamente. La magnitud del evento fue de 6.3. Los resultados revelan que el 15.07 % de la cuenca presentó susceptibilidad baja, mientras que el 22.45 % evidenció susceptibilidad moderada y el 62.48 % registró susceptibilidad alta. La validación del mapa de susceptibilidad mostró que puede ser usado como un modelo predictivo de la localización de futuros movimientos en masa. Tanto el análisis de susceptibilidad, como el mapa inventario y la topografía digital generados constituyen una línea de base para el área de estudio, hasta el momento inexistente y servirán para futuros estudios de peligrosidad y riesgo por procesos de remoción en masa. Asimismo, podrán ser usados como una herramienta de planeamiento y para la implementación de estrategias de mitigación y reducción del riesgo.

Palabras Claves: Susceptibilidad por procesos de remoción en masa, Factores Condicionantes, Método Heurístico, Mapa Inventario, Tartagal.

Abstract

Mass movements are common in the Sierras Subandinas, where for the past 50 years there have been several events that resulted in loss of human lives and material damages in the communities living nearby. This study presents the first susceptibility zonation map for mass movements for Tartagal River basin (Salta, Argentina) using Remote Sensing and Geographic Information System (GIS) techniques. A Digital Elevation Model (DEM) of 12.5 m of spatial resolution was used to extract the main conditioning factors affecting the occurrence of mass movements: slope gradient and curvature. Identification and mapping of mass movements (inventory) of the event 2009, was obtained from a supervised classification (maximum likelihood algorithm) of 10 m multi-spectral SPOT-4 imagery, acquired immediately after the event. Conditioning factors, inventory map and a lithological map, were used to build a mass movements susceptibility model through an Heuristic Method in a GIS. The affected area, volume of material removed and magnitude of the event, were about 3 km^2, 2 km^3 and 6.3, respectively. The results revealed that 15.07 % of the River basin includes terrains with low susceptibility; and 22.45 % includes moderate susceptibility and a 62.48 % includes a high susceptibility. Validation showed that susceptibility map can be used as a predictive model for the future location of mass movements. Susceptibility analysis, inventory map and digital topography, are a baseline for the study area and they will be useful for future hazard and risk assessments. They may also be used as a planning tool, and to implement mitigation strategies and risk reduction.

Keywords: Mass movements susceptibility, Conditioning factors, Heuristic Method, Inventory map, Tartagal.

Índice

Agradecimientos ____ iii

Resumen ____ iv

Abstract ____ v

Lista de Figuras ____ ix

Lista de Tablas ____ xii

Capítulo I: *Introducción* ____ 1

1.1. Desastres Naturales ____ 1

1.1.1. Tipos de Desastres Naturales ____ 4

1.1.2. Riesgo por Desastres Naturales ____ 6

1.2. Procesos de Remoción en masa ____ 9

1.2.1. Los procesos de remoción en masa en el mundo ____ 10

1.2.2. Clasificación y Tipos de procesos de remoción en masa ____ 14

1.2.3. Factores Condicionantes y Desencadenantes ____ 18

1.2.4. Mapa Inventario de Procesos de remoción en masa ____ 18

1.2.5. Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica aplicados al estudio de los procesos de remoción en masa ____ 20

1.3. Susceptibilidad, Peligrosidad y Riesgo por procesos de remoción en masa ____ 23

1.3.1. Mapa de Zonación de Susceptibilidad ____ 24

1.3.2. Métodos de mapeo de áreas susceptibles ____ 26

1.3.2.1. Método Heurístico ____ 26

1.3.2.2. Método Determinístico ____ 26

1.3.2.3. Método Estadístico ____ 27

1.4. Objetivo General y Específicos ____ 28

Capítulo II: *Área de Estudio* ____ 29

2.1. Caracterización Ambiental ____ 30

2.2.1 Geología ____ 30

2.2.2. Clima ____ 32

2.2.3. Vegetación 34
2.2. Población y Usos del suelo 36
2.3. El evento de procesos de remoción en masa de Febrero de 2009 40
2.3.1. La intervención humana y los cambios producidos en la Cuenca 45
Capítulo III: *Materiales y Métodos* 48
Materiales 49
3.1. Imágenes Satelitales 49
3.1.1. ASTER 49
3.1.2. SPOT-4 49
3.1.3. ALOS 50
3.1.4. LANDSAT 51
3.2. Modelo Digital de Elevaciones (DEM) 52
3.2.1. DEM SRTM 52
3.2.1. DEM ALOS 52
3.3. Carta Litológica 53
3.4. Otros Datos Auxiliares 53
Métodos 54
3.5. Identificación y Mapeo de procesos de remoción en masa 54
3.6. Análisis de factores condicionantes 59
3.6.1. Pendiente 59
3.6.2. Curvatura 60
3.6.3 Orientación de la pendiente (Aspecto) 61
3.6.4. Litología 61
3.6.5. Mapa Inventario de Procesos de Remoción en Masa 62
3.6.6. Cobertura Vegetal 62
3.7. Zonación de Susceptibilidad por procesos de remoción en masa 65
3.7.1. Validación 66
Capítulo IV: *Resultados* 68
4.1. Identificación y Mapeo de procesos de remoción en masa 68
4.2. Relación entre factores condicionantes y procesos de remoción en masa 72
4.2.1. Pendiente 72

4.2.2. Curvatura _____ 75
4.2.3. Litología _____ 76
4.2.4. Mapa Inventario de Procesos de Remoción en Masa_____ 79
4.3. Zonación de Susceptibilidad por procesos de remoción en masa _____ 80
4.3.1. Validación _____ 81
Capítulo V: *Discusión* _____ 83
5.1. Identificación y Mapeo de procesos de remoción en masa _____ 83
5.2. Area, Volúmen y Magnitud del evento 2009 _____ 85
5.3. Zonación de Susceptibilidad por procesos de remoción en masa _____ 86
Capítulo VI: *Conclusiones* _____ 91
Referencias _____ 94
Apéndice __ _____ 109

Lista de Figuras

Figura 1. Caracterización de los desastres naturales en el continente americano (Cepal, 2011).

Figura 2. Relación de los componentes del riesgo por desastre natural.

Figura 3. Localización de los movimientos en masa en el mundo (Petley, 2010).

Figura 4. Tipos de desastres ocurridos en el período 2000-2010 reportados por: A) La Carta Internacional "El Espacio y los Grandes Desastres" y, B) La Base de Datos Internacional de desastres (EM-DAT).

Figura 5. Número de fatalidades inducidas por movimientos en masa en el mundo registrados en los años 2003, 2009 y 2010 (Petley, 2010).

Figura 6. Movimientos en masa. A) Desprendimiento ó caída de material. B) Vuelco ó desplome de material (USGS, 2004).

Figura 7. Tipos de deslizamientos. C) Deslizamiento Rotacional; D) Deslizamiento traslacional y, E) Deslizamiento de bloques (USGS, 2004).

Figura 8. Tipos de Flujos. F) Flujo de detritos; G) Flujo de suelo (USGS, 2004).

Figura 9. Expansiones laterales (USGS, 2004).

Figura 10. Características generales de un proceso de remoción en masa (Marcelino, 2004).

Figura 11. Relación conceptual entre susceptibilidad, peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo.

Figura 12. Localización de la cuenca del río Tartagal, en la provincia de Salta (Argentina), sobre una composición RGB: 431 de la imagen ASTER, de fecha 04/09/2004.

Figura 13. Hoja de Peligrosidad Geológica 2363-I de Tartagal (escala 1:200.000) (Bonorino *et al.*, 2001).

Figura 14.Mapa Litológico de la cuenca del río Tartagal (Salta, Argentina) sobre una composición RGB: 431 de la imagen ASTER, de fecha 04/09/2004.

Figura 15. Representación de variables climáticas en la Provincia de Salta (promedio 1934-1990). A) Temperatura media anual (mm); B) Precipitación anual (mm); C) Evapotranspiración Potencial anual (mm); D) Balance Hídrico, BH = P (precipitación) – EP (evapotranspiración potencial) (Bianchi, *inédito*).

Figura 16. Distribución de los sectores de "Yungas" en el Noroeste Argentino y en la cuenca del río Tartagal, Salta.

Figura 17. Mapa de la antigua Finca Tartagal, Salta (Argentina) (Alonso, 2012).

Figura 18. Distribución espacial de las tierras transformadas en la parte centro-este de la Provincia de Salta, en los años 1975, 1986, 1998, 2004 y 2008 (Plan de Ordenamiento Territorial, 2009).
Figura 19. Categorías de las áreas transformadas en la Provincia de Salta (Plan de Ordenamiento Territorial, 2009).
Figura 20. Vista de los de sedimentos, ramas y troncos que llegaron desde la cuenca alta hasta el puente de la avenida principal de la ciudad de Tartagal, ubicada en la cuenca baja del río homónimo (Baumann *et al*., 2009).
Figura 21. Vista una de las cárcavas producidas por la erosión en el río Tartagal en el momento de la creciente (Baumann *et al*., 2009).
Figura 22. Superficies afectadas por el alud en la zona urbana de la ciudad de Tartagal en imagen satelital de Google Earth. El polígono rojo indica la zona más perturbada; el área en amarillo indica cuán lejos llegó el agua y el material sedimentado (Baumann *et al*., 2009).
Figura 23. Quebrada del Aguay en la cuenca alta del río Tartagal A). Se observa erosión en el cauce principal, movimientos de masa en las laderas y depósitos de troncos, ramas y sedimentos que dejaron los flujos a su paso; B) Avalancha de detritos (Baumann *et al*., 2009).
Figura 24. Vista aérea de la planta potabilizadora de agua del Aguay (Baumann *et al*., 2009).
Figura 25. Vista del río Tartagal en la cuenca media . A) En el margen derecho se observan depósitos de la última crecida sobre la terraza del río; B) Erosión lateral en la terraza del río provocada por el paso de la creciente del evento 2009. (Baumann *et al*., 2009).
Figura 26. Representación esquemática que muestra los datos usados y procedimientos de trabajo realizados para la obtención del mapa de zonación de susceptibilidad por procesos de remoción en masa en la cuenca del río Tartagal.
Figura 27. Máscaras utilizadas para cubrir las zonas espectralmente similares a los procesos de remoción en masa en la cuenca del río Tartagal, vista una composición RGB: 431 de la imagen SPOT- 4 , de fecha 15/05/2009.
Figura 28. Puntos utilizados para la validación de la clasificación supervisada en dos zonas de la cuenca del río Tartagal (Salta, Argentina), registrados luego del evento del año 2009.
Figura 29. Regiones de Interés (ROIs) registradas en la imagen SPOT-4 y perfil espectral de las ROIs correspondientes a: A) Procesos de remoción en masa y, B) Bosque.

Figura 30. Identificación y mapeo de los procesos de remoción en masa (sin discriminar por tipo), mediante la aplicación del algoritmo de clasificación de máxima similitud con un umbral de probabilidad de 0.97, vista sobre una composición RGB: 321 de la imagen SPOT-4, de fecha: 15/02/2009.
Figura 31. Localización de los puntos de validación (círculos en rojo) y cicatrices de movimientos de laderas asociados a los puntos de validación en dos zonas de la cuenca del río Tartagal (Quebrada del Aguay: Puntos 154 y 155 y Yariguarenda: Puntos. 1, 2, 3 y 4), sobre una combinación RGB: 321 de la imagen SPOT-4, de fecha 15/02/2009 y clasificación resultante.
Figura 32. Mapa de pendientes reclasificado, generado a partir del DEM de ALOS de 12.5 de resolución espacial.
Figura 33. Frecuencia del número de píxeles positivos para movimientos en masa en cada rango de pendientes reclasificado, en las zonas que incluyen los puntos de validación: Quebrada El Aguay y Yariguarenda.
Figura 34. Mapa de Susceptibilidad del terreno debido a la pendiente.
Figura 35. Mapa de Susceptibilidad del terreno debido a la curvatura
Figura 36. Mapa Litológico de la cuenca del río Tartagal, Salta y movimientos en masa identificados en cada tipo litológico, sobre una composición color RGB: 431 de la imagen ASTER, de fecha: 09/04/2004.
Figura 37. Frecuencia del área de los movimientos en masa identificados en cada grupo litológico del área de estudio.
Figura 38. Mapa de Susceptibilidad del terreno debido a la litología.
Figura 39. Mapa de Susceptibilidad del terreno debido a la presencia de procesos de remoción en masa.
Figura 40. Mapa de zonación de susceptibilidad por procesos de remoción en masa, obtenido mediante el Método Heurístico, con la incorporación de los mapas temáticos de litología, pendientes, curvatura e inventario de procesos de remoción en masa.
Figura 41. Vista 3-D de parte de los procesos de remoción en masa del evento del año 2006 digitalizados en la imagen de relieve de Google Earth, de fecha: 09/10/2006.
Figura 42. Superposición de las categorías del mapa de zonación de susceptibilidad y procesos de remoción en masa (evento del año 2006) en la cuenca media del río Tartagal.

Lista de Tablas

Tabla 1. Clasificación de Desastres Naturales (Guha-Sapir *et al*., 2011).

Tabla 2. Clasificación de procesos de remoción en masa (EPOCH, 1993).

Tabla 3. Coordenadas geográficas y breve descripción de los movimientos de laderas registrados mediante GPS Gamín, en el sur (Quebrada El Aguay) y noreste (Yariguarenda) de la cuenca del río Tartagal, Salta. (Fuente: V. Baumann-SEGEMAR).

Tabla 4. Pesos asignados a los factores condicionantes de los procesos de remoción en masa de la cuenca del río Tartagal, en el Modelo Heurístico.

Tabla 5. Número de pixeles identificados como positivos para movimientos en masa, estimación del área afectada, volúmen promedio del material movilizado por los procesos de remoción en masa, y magnitud del evento de Febrero de 2009 en la cuenca del río Tartagal con diferentes umbrales aplicados al algoritmo de clasificación de Máxima Verosimilitud.

Tabla 6. Medidas de posición (percentiles) y de tendencia central para pendientes (en grados) de la cuenca alta y media del río Tartagal. Referencias: P_x= Percentil x; Q_x= Quartil x.

Tabla 7. Relación entre tipos de pendientes y procesos de remoción en masa en el área de estudio y susceptibilidad asignada.

Tabla 8. Relación entre tipos de curvaturas y procesos de remoción en masa en el área de estudio y susceptibilidad asignada.

Tabla 9. Relación entre tipos de litologías y procesos de remoción en masa en el área de estudio y susceptibilidad asignada.

Tabla 10. Susceptibilidad asignada a la presencia/ausencia de los procesos de remoción en masa del evento del año 2009 en el área de estudio.

Tabla 11. Superficies resultantes del modelo de zonificación de susceptibilidad por procesos de remoción en masa en la cuenca del río Tartagal.

Tabla 12. Tipos de orientación de las laderas y su relación con los movimientos en masa (en término de áreas) en la cuenca del río Tartagal.

Capítulo I

Introducción

1.1. Desastres Naturales

Un desastre natural puede definirse como el resultado del impacto de un fenómeno natural extremo o intenso sobre un sistema social, que causa serios daños ó perjuicios que exceden la capacidad de los afectados de hacer frente al impacto (Tobin and Montz, 1997). Desde una perspectiva económica, puede ser definido como un evento natural que causa una perturbación en el funcionamiento del sistema económico, con un impacto negativo significativo sobre los bienes, factores productivos, empleo y consumo (Hallegatte and Przylusky, 2010). Para Zhang *et al*., (2005) significa una variación de orden natural que excede cierto nivel y resulta en algún daño al desarrollo humano y socio-económico. El Centro de Investigación sobre la epidemiología de los desastres (CRED, por sus siglas en inglés) lo define como una situación o evento que sobrepasa la capacidad local, llegando a necesitarse ayuda a nivel nacional o internacional; es un suceso imprevisto y repentino que a menudo causa grandes daños, destrucción y sufrimiento humano. El mencionado centro establece que para que un desastre sea incorporado en la base de datos, al menos uno de los siguientes criterios debe cumplirse (Cepal, 2011; Guha-Sapir *et al*., 2011).

- 10 ó más personas han resultado muertas
- 100 ó más personas han sido reportadas como afectadas
- Hay declaración de estado de emergencia
- Hay llamado a la asistencia internacional

A nivel mundial existen iniciativas de organismos internacionales para la reducción de desastres. En la década de los '90, declarada “Decenio Internacional para la Reducción de Desastres”, se comenzó a prestar atención a la necesidad de abordar las causas que los generan. A comienzos del año 2000, la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (EIRD) del Sistema de Naciones Unidas, proveyó un nuevo impulso para la reducción de las condiciones de riesgo orientado a garantizar la sustentabilidad de los procesos de desarrollo. La estrategia EIRD se centra en un cambio conceptual que va desde la protección ante los peligros, al manejo de

riesgo a través de la incorporación de la prevención y reducción del riesgo de desastres al proceso de planificación del desarrollo. Durante la Conferencia Mundial para la Reducción de Desastres (Hyogo Japón, 2005), un total de 168 gobiernos adoptaron el Marco de Hyogo para el 2005-2015 (ratificado por la Asamblea General de las Naciones Unidas), que sostiene la necesidad de aumentar la resilencia (entendida como la capacidad para enfrentar, resistir, adaptarse y recuperarse) de las naciones y comunidades ante los desastres. En el mismo marco hace un llamado a todas las naciones para que apoyen la creación y el fortalecimiento de mecanismos nacionales integrales, tales como las Plataformas Nacionales Multisectoriales para garantizar de esta manera que la reducción del riesgo de desastres (RRD) sea una prioridad nacional y local (Fernández Bussy *et al*,. 2010).

Argentina presenta un complejo escenario de amenazas, consecuencia casi directa de su extensión, diversidad y heterogeneidad de ambientes que la integran. Hasta hace relativamente poco tiempo se consideró al riesgo de desastres como una cuestión residual del desarrollo territorial y, como tal, se lo incluía como una contingencia imprevisible que requería de una respuesta de emergencia. Esta idea se ha ido modificando en la medida que los costos sociales y económicos que un desastre origina, superan largamente su condición de "residual", resultando entonces necesaria la incorporación de la dimensión del riesgo en los procesos de planificación de manera tal que permitan eliminar, controlar o mitigar los efectos que originan estos eventos sobre la población, actividades e instalaciones humanas. Esto significa el comienzo de una nueva etapa porque la problemática de riesgos no había formado parte hasta el momento, del perfil de temas prioritarios de los gobiernos nacionales y provinciales. Recientemente, el Programa Nacional de Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres y Desarrollo Territorial, mediante el documento PNUD-Arg 05/020, caracterizó el riesgo de desastres a partir de la identificación de las principales amenazas y factores de vulnerabilidad a nivel nacional y provincial.

Entre las diversas amenazas que afectan a la provincia de Salta, específicamente al Departamento General San Martín, situado al norte de la provincia, se destacan: (1) las *amenazas geológicas* (por ej. inestabilidad de laderas); (2) los *procesos de degradación* (por ej. deforestación y pérdida de diversidad por explotación maderera, incendios forestales y procesos erosivos de gran escala), y a*menazas hidrometereológicas* (por ej. crecidas en la cuenca del río Tartagal, desbordes,

sedimentación y erosión durante los períodos de crecidas y procesos de remoción en masa durante los meses de precipitaciones estivales) (Fernández Bussy *et al.*, 2010).

Estas últimas dos amenazas se encuentran íntimamente relacionadas. A pesar de que la función del bosque como protector del suelo es ampliamente reconocida y que las consecuencias de la deforestación en el ciclo hidrológico son cuantificables, la incidencia de un bosque degradado en el ciclo hidrológico es una temática en la que hay mucho por decir (Brouver *et al*., 2006). En la Provincia de Salta, las áreas boscosas ocupan casi 8 millones de ha (representadas por dos grandes ecoregiones: Yungas o Selvas Subtropicales de Montaña y Chaco Seco o Semiárido). Estos ecosistemas resultan críticos para el mantenimiento de la biodiversidad regional, para el desarrollo sustentable del sector forestal provincial y para el mantenimiento de un conjunto de servicios ambientales, tales como regulación climática, producción de agua para riego, protección del suelo, espacios para esparcimiento y desarrollo del ecoturismo. Las áreas boscosas también son relevantes para la obtención de recursos de subsistencia para una parte importante de las comunidades rurales y peri-urbanas habitantes de las ciudades del pedemonte y las áreas montañosos de la provincia (abastecimiento de leña para calefacción y cocina, cacería, productos medicinales, recolección de miel, etc.) (Plan de Ordenamiento territorial, 2009).

La degradación del bosque y por ende de los suelos, afecta la capacidad de infiltración y retención de humedad, lo que en término hidrológicos significa aumento extraordinario del escurrimiento con incremento del pico de crecida estival y reducción de caudales durante la bajada invernal (estiaje), es decir, la cuenca reduce su capacidad de regulación del flujo de agua. Paralelamente, la mayor torrencialidad fluvial junto con la menor cobertura vegetal, incrementa la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa (tanto naturales como inducidos por actividades antrópicas) y el aporte de materiales clásticos desde la vertiente del bosque subtropical produciendo inundaciones y destrucción de las infraestructuras en las áreas urbanas y rurales situadas en el pedemonte (Brouver *et al*., 2006).

1.1.1. Tipos de Desastres Naturales

En la literatura especializada, se presentan diversas propuestas de clasificación de los desastres naturales. La Base de Datos Internacional para Desastres (EM-DAT) del año 2011, distingue dos categorías genéricas de desastres: *naturales* y *tecnológicos.* La categoría de desastre natural se divide en 5 subgrupos de desastres (Tabla 1).

El desastre biológico es aquel causado por la exposición a organismos vivientes, gérmenes y substancias tóxicas; el desastre físico es un evento originado en tierra sólida. En cambio, el desastre hidrológico es el causado por desviaciones en el ciclo normal del agua y/ó por desbordes de cuerpos de agua.

El desastre meteorológico se define como un evento causado por procesos atmosféricos de pequeña/mediana escala (en el espectro de minutos a días) y el desastre climatológico es el evento provocado por procesos de vida media/larga (en el espectro va de variabilidad climática intra-estacional a multi-décadas) (Guha-Sapir *et al*., 2011).

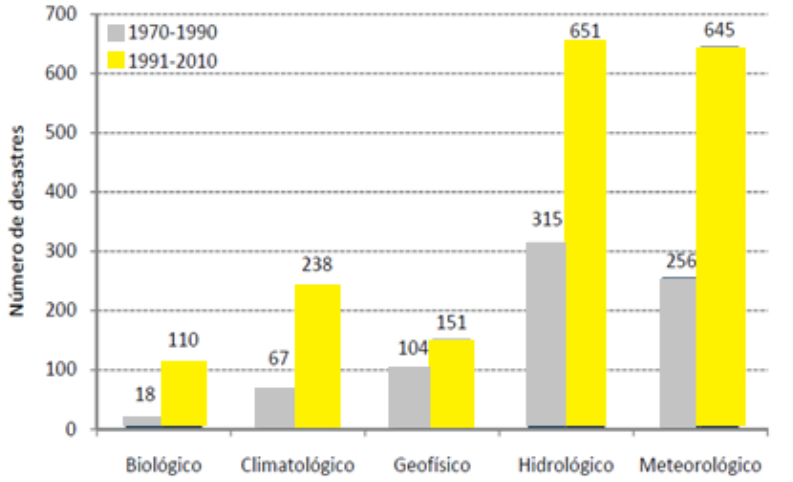
Tabla 1. Clasificación de Desastres Naturales (Guha-Sapir *et al*., 2011).

Grupo de Desastre	Tipo principal de desastre	Subtipo de desastre
Biológico	Epidemia	Enfermedades Infecciosas (virales, bacterianas, parasitarias, por hongos)
	Infestación por insecto	Enfermedad Priónica Infecciosa (encefalopatías) Saltamontes/Langostas/Lombrices
Físico	Terremoto	Temblores
		Tsunami
	Volcán	Erupción Volcánica
	Movimiento en masa (seco)	Caída de rocas. Deslizamientos. Avalanchas. Subsidencia
Hidrológico	Inundación	Inundación General. Riada (crecida de ríos). Mareas de tempestad. Inundación Costera
	Movimiento en masa (húmedo)	Caída de rocas. Deslizamientos. Avalanchas Subsidencia
Meteorológico	Tormenta	Tormenta tropical. Ciclón extra-tropical (Tormenta de invierno). Tormenta Local
Climatológico	Temperatura extrema	Olas de calor, Olas de frío, Inviernos extremos
	Sequía	-
	Incendios forestales	Fuego de bosque, Fuego de tierra (pasto, matorral)

En las últimas décadas, las investigaciones han demostrado que no solo han aumentado la cantidad de desastres naturales sino también su intensidad, resultando en serios daños ó perjuicios sociales y económicos. Por ejemplo, en el continente americano las inundaciones y tormentas no solo fueron los desastres que más se presentaron en los últimos 40 años sino que los desastres hidrológicos y meteorológicos ocurridos entre 1991 y 2010 fueron más del doble frente a los que se presentaron entre 1970 y 1990. Los desastres climatológicos (incendios forestales, sequías y temperaturas extremas), ocurridos en las últimas dos décadas fueron 3.5 veces mayor a los del período 1970-1990 (Figura 1) (Cepal, 2011). De acuerdo a algunos investigadores, éste escenario

puede estar vinculado al calentamiento global, como una de las consecuencias directas de los cambios climáticos (Marcelino, 2004).

Sudamérica y Centroamérica registraron el mayor número de personas afectadas por los desastres naturales ocurridos durante el período 1970-2010 (136 millones de personas). En el año 2011, se produjeron 93 desastres naturales, de los cuales la mayoría se debió a desastres hidrológicos (45.2 %) y meteorológicos (35.5 %); y el número de víctimas de ambos tipos de desastres fue el doble con respecto al promedio anual de victimas para el período 2001-2010. El daño económico asociado (67.3 billones de dólares estadounidenses) incrementó un 33.9 % comparado con el período 2001-2010 (US$ 50.3 billones de dólares estadounidenses) (Cepal, 2011).



Fuente: CEPAL, sobre la base de EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database

Figura 1. Caracterización de los desastres naturales en el continente americano (Cepal, 2011).

1.1.2. Riesgo por Desastres Naturales

Un término relacionado a los desastres naturales, es el de "Riesgo por Desastres Naturales", definido como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno natural y el grado de daño causado por éste durante varios años siguientes al evento. De ésta manera, el riesgo de desastre natural (de una región, una familia, ó una persona) está formado por cuatro factores: peligrosidad, exposición, vulnerabilidad y respuesta de emergencia/capacidad de recuperación (Figura 2) (Nishikawa, 2003; Hiorokazu, 2003; Zhang *et al*., 2004; Zhang *et al*., 2005).

La *peligrosidad* representa a una amenaza ó evento natural extremo que afecta adversamente la vida humana, la propiedad o actividad. La *exposición* describe el número de personas, el valor de la propiedad, estructuras y actividades que pueden ser afectadas de modo adverso. La *vulnerabilidad* es el grado de susceptibilidad de los bienes y población hacia el peligro. Según la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (UNISDR, 2009), existen diversos aspectos de la vulnerabilidad que surgen de factores físicos, sociales, económicos y ambientales. Entre los ejemplos se incluyen: el diseño inadecuado y la construcción deficiente de los edificios, la protección inadecuada de los bienes, la falta de información y concientización pública, un reconocimiento oficial limitado del riesgo y de las medidas de preparación y la desatención a una gestión ambiental sensata ó prudente. La vulnerabilidad varía considerablemente dentro de una comunidad y en el transcurso del tiempo. La *respuesta de emergencia y capacidad de recuperación*, denota la habilidad de manejar el riesgo por desastres naturales (Cepal, 2011). Este concepto hace referencia a la "resiliencia", la capacidad de un sistema, comunidad ó sociedad expuestos a una amenaza para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de sus efectos de manera oportuna y eficaz, lo que incluye la preservación y la restauración de sus estructuras y funciones básicas. Es el grado en el que esa comunidad es capaz de organizarse –con los recursos con que cuenta- tanto antes como durante los momentos apremiantes de una amenaza (UNISDR, 2009).

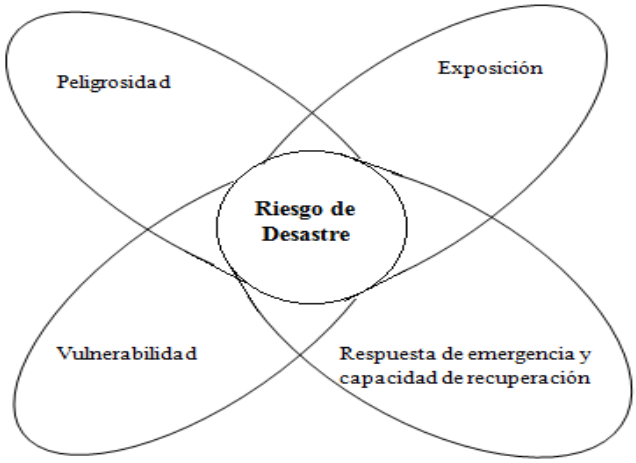


Figura 2. Relación de los componentes del riesgo por desastre natural.

Así, el riesgo por desastres naturales puede ser definido como:

Riesgo= f (Peligrosidad, Exposición, Vulnerabilidad, Respuesta de Emergencia/capacidad de recuperación) ***(1)***

Para reducir el riesgo de desastres naturales, es importante reducir el nivel de vulnerabilidad, mantener la baja exposición de la población y la propiedad, y mejorar la respuesta de emergencia y capacidad de recuperación de la misma (resiliencia).

1.2. Procesos de Remoción en Masa

El origen del término "movimientos en masa", se remonta a los aportes de Penck (1894) quien hace la distinción entre éste término y el "transporte de una masa". El primer término se refiere a los movimientos originados por la acción de la gravedad, es decir, sin la influencia de otros medios de transporte, en tanto que el segundo considera el material transportado por agentes como el agua, el aire y el hielo. Sharpe (1938) definió un deslizamiento de tierra ("landslide", en inglés) como un movimiento perceptible ladera abajo de una masa relativamente seca de tierra, roca o de una mezcla de ambas, a través de un mecanismo de deslizamiento o desprendimiento. Terzaghi (1950), centró su definición en un desplazamiento rápido de una masa de roca, suelo residual o sedimentos de una ladera, en el cual el centro de gravedad de la masa que se desplaza se mueve hacia abajo y hacia el exterior. Tiempo después, Varnes (1958) especificó que este movimiento hacia abajo de los materiales formadores de las laderas puede incluir materiales naturales y artificiales. Zaruba y Mencl (1969), se refirieron a un movimiento rápido de rocas en deslizamiento, las cuales están separadas por un plano infrayacente, definido en posición estacionaria. Skempton y Hutchinson (1969), definieron el término deslizamiento de tierra, como un movimiento ladera abajo de masas de suelo o roca, que ocurre en una superficie de cizallamiento en los límites de la masa desplazada. Para Gary *et al*.,(1972), "landslide" es un término general que considera una gran variedad de formas y movimientos en masa, los cuales involucran el transporte gravitacional a una velocidad de moderadamente rápida a rápida, de un cuerpo de suelos o rocas, ladera abajo, la cual no siempre ocurre sobre una superficie de deslizamiento. Sin embargo, para Coates (1979), un "landslide" representa una categoría de fenómenos incluidos dentro de los movimientos de remoción en masa, en los cuales la gravedad es la principal fuerza involucrada. Finalmente, Brunsden (1979) optó por la expresión "movimiento en masa", indicando que este sirve para definir aquellos movimientos ladera abajo que no requieren el transporte de un medio como el agua, el aire o el hielo.

Los movimientos en masa, se conocen también como procesos de ladera, procesos de remoción en masa o procesos gravitacionales. En ciertas ocasiones son incorrectamente denominados deslizamientos de tierra ("landslides"). El error es de concepto, dado que la traducción literal es correcta. De acuerdo con Soriano Franquet (2009), el error conceptual resulta de la inconsistencia de agrupar a los diferentes tipos de procesos de remoción bajo el término "deslizamiento". Dicha

expresión hace referencia a un fenómeno físico concreto. Se trata de un mecanismo bien definido como el movimiento de un cuerpo (materiales del tipo roca, detritos o derrubios, suelo o tierra) sobre un plano o superficie de deslizamiento. Entonces, la utilización del término "deslizamiento" o "deslizamiento de tierra", para referirse a cualquier tipo de movimiento en masa es incorrecto, pues no siempre se observa o se encuentra definida una superficie de deslizamiento claramente visible. Por lo tanto, no debería emplearse el término deslizamiento de tierra como sinónimo de un movimiento en masa.

En éste estudio se adopta el concepto de "procesos de remoción en masa", "movimientos de laderas" ó"movimientos en masa", para referirse a cualquier tipo de movimiento que ocurra ladera abajo en los cuales la gravedad sea la principal fuerza involucrada.

1.2.1. Los procesos de remoción en masa en el mundo

Los procesos de remoción en masa, son uno de los principales causantes de desastres naturales que producen un daño significativo a las vidas humanas, a las propiedades y proyectos de ingeniería en todas las áreas montañosas del mundo (Malamud *et al.*, 2004; Martha *et al*., 2010). De acuerdo a un reciente reporte mundial aproximadamente 4 millones de personas fueron afectadas por movimientos en masa en el año 2006 (OFDA/CRED 2006).

Tales movimientos de laderas, tienen una amplia distribución en todo el mundo (Figura 3). Es de destacar que el mayor registro localizado en algunas zonas, no implica necesariamente que estén en mayor número y/o que sean más frecuentes sino que existen zonas mejor relevadas que otras.

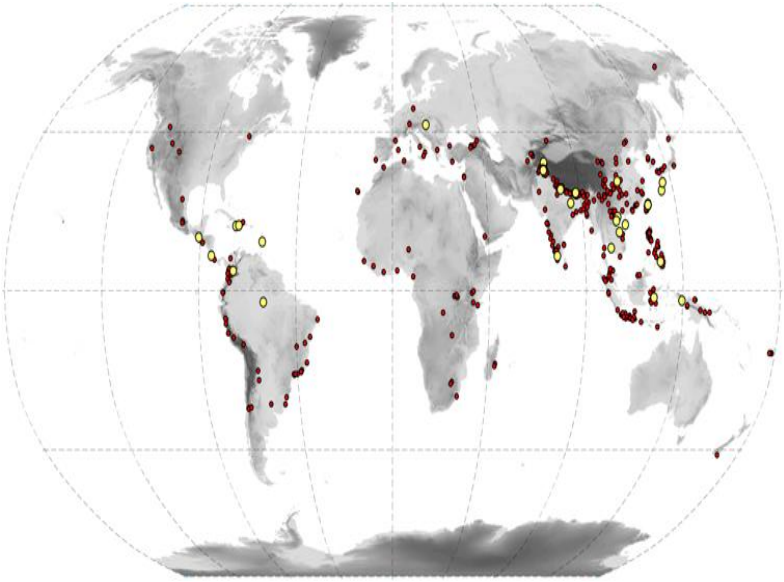


Figura 3. Localización de los movimientos en masa en el mundo. Puntos rojos: movimientos en masa en el año 2009. Puntos amarillos: movimientos en masa en el año 2010 (Petley, 2010).

La Carta Internacional "*El Espacio y los Grandes Desastres*", indica que durante el período 2000-2010 se registraron 292 activaciones de la misma, de las cuales 12 fueron por movimientos de laderas ocurridos en mayor medida en el año 2010; ocupando de ésta manera el séptimo puesto en el ranking de los tipos de peligros que provocaron activaciones de la Carta. En cambio, para el mismo período de tiempo, la *Base de Datos Internacional de Desastres* (EM-DAT), registró 224 eventos de movimientos en masa en todo el mundo, de un total de 3,638 casos. La mayoría de los mismos ocurrieron en el año 2009, ocupando el cuarto lugar de importancia (Figura 4).

Cabe mencionar que tras la Conferencia UNISPACE III, celebrada en Viena (Austria) en 1999, la Agencia Espacial Europea y la Agencia Espacial Francesa (ESA y CNES, respectivamente) elaboraron la Carta Internacional sobre el Espacio y las Grandes Catástrofes, la cual fue puesta en vigencia oficialmente el 1 de noviembre del año 2000. La Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), se convirtió en miembro al firmar la Carta el 16 de junio de 2003. La Carta Internacional, tiene como objetivo proporcionar, a través de Usuarios Autorizados, un sistema unificado de adquisición y entrega de datos espaciales, dedicado a los afectados por catástrofes naturales o antropogénicos. Cada agencia miembro ha comprometido recursos para apoyar las

disposiciones de la Carta y, así, ayudar a mitigar los efectos generados por las catástrofes sobre la vida de las personas y los bienes (http://www.disasterscharter.org/web/charter/home).

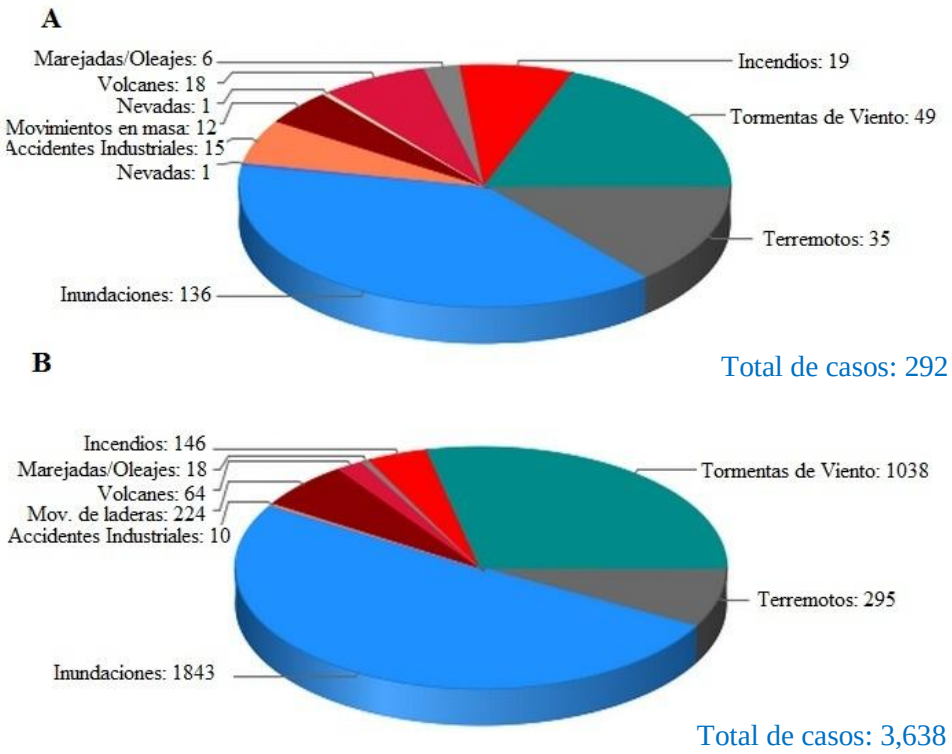


Figura 4. Tipos de desastres ocurridos en el período 2000-2010 reportados por: A) La Carta Internacional "El Espacio y los Grandes Desastres" y, B) La Base de Datos Internacional de desastres (EM-DAT) (Carta Internacional "El Espacio y los grandes Desastres", http://www.disasterscharter.org/web/charter/home).

En el año 1993 los movimientos en masa causaron 2,517 muertes en todo el planeta (Fernándes y Amaral, 1996). En un documento reciente, se reconoció que en el año 2010 ocurrió la mayor cantidad de fatalidades inducidas por movimientos en masa a nivel mundial, comparado con los años 2003 y 2009 (Petley, 2010) (Figura 5). En Italia, por ejemplo, entre los años 1950 y 2009, los procesos de remoción en masa han causado al menos 6,349 víctimas (Salvati *et al.*, 2010). En los Estados Unidos, éstos se producen en los 50 Estados, principalmente en las zonas costeras y montañosas de California, Oregon y Washington y causan aproximadamente U$S 3,5 mil millones de pérdidas económicas y entre 25-50 pérdidas de vidas humanas al año (Petley, 2010)

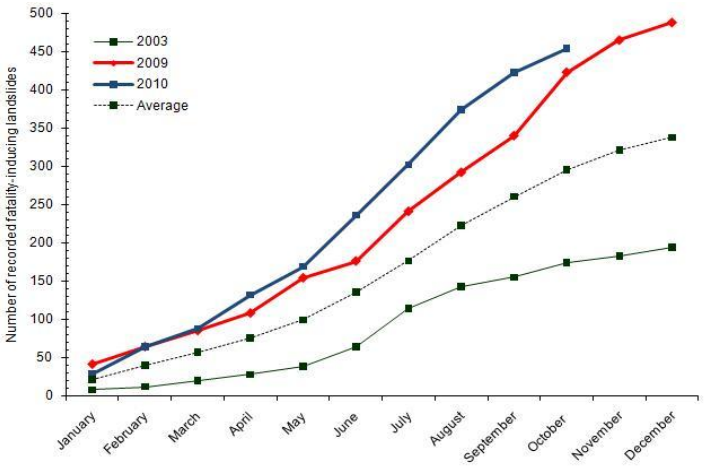


Figura 5. Número de fatalidades inducidas por movimientos en masa en el mundo registrados en los años 2003, 2009 y 2010 (Petley, 2010).

En América Latina, el número de víctimas y daños materiales por evento suelen ser elevados, ya que muchos asentamientos humanos se encuentran al pie de escarpes montañosos o bien en zonas próximas. En el norte de Argentina, éstos tipos de procesos, son muy comunes en las Sierras Subandinas, en donde durante los últimos 50 años se han producido varios eventos que resultaron en numerosas muertes y pérdidas económicas en las comunidades que viven al pie de las mismas. Algunos de los eventos más conspicuos en el norte de la Provincia de Salta fueron los ocurridos en 1984 y 2000 en Campamento Vespucio, y en los años 2006 y 2009 en cercanías de la Ciudad de Tartagal (Baumann *et al.* 2009; Alonso, 2012). El último evento señalado, dejó un saldo de tres muertos y alrededor de 1,000 personas evacuadas.

Si bien en los últimos años y a nivel mundial, ha aumentado la preocupación en cuanto a los daños ocasionados por estos procesos en masa, en nuestro país aún no adquiere la importancia apropiada (Esper Angillieri, 2011). Ante éste cuadro, es esencial que se realicen estudios de las áreas susceptibles a movimientos en masa, no solamente de aquellas áreas densamente pobladas sino también en áreas de probable expansión urbana, en pos de buscar una mejor forma de uso y ocupación del suelo y asimismo lograr la protección ante los peligros a través de la incorporación de la prevención y reducción del riesgo de desastre.

1.2.2. Clasificación y Tipos de procesos de remoción en masa

Las clasificaciones existentes de los procesos de remoción en masa, utilizan distintos parámetros de base, como el tipo de material involucrado (roca, suelo, detritos), la velocidad (lenta, rápida), el contenido de agua, el mecanismo de rotura, entre otros (Proyecto Multinacional Andino, 2007). La clasificación aceptada y aplicada a nivel internacional se basa en el mecanismo de movimiento, por lo que de manera general, estos movimientos se dividen en caídas o desprendimientos; vuelcos o desplomes; deslizamientos; expansiones laterales; flujos y movimientos complejos (Soriano Franquet, 2009). Una simple y completa clasificación que considera estos aspectos es la dada por el programa EPOCH (1993), el cual a partir de la clasificación de Varnes (1978) y Hutchinson (1988), elaboró una tabla que incluye la intervención de distintos movimientos y materiales que los forman (Tabla 2).

Tabla 2. Clasificación de procesos de remoción en masa (EPOCH, 1993).

Mecanismo del Movimiento	**Tipo de material involucrado**		
	Roca	**Detritos**	**Suelo**
Desprendimientos	Caída o desprendimiento de rocas	Caída o desprendimiento de detritos	Caída o desprendimiento de suelos
Vuelco ó desplome	Vuelco o desplome de rocas	Vuelco o desplome de detritos	Vuelco o desplome de suelos
Deslizamiento rotacional simple	Individual Múltiple Sucesivo	Individual Múltiple Sucesivo	Individual Múltiple Sucesivo
Deslizamiento Traslacional	Deslizamiento de rocas en bloque	Deslizamiento de detritos en bloque	Deslizamiento traslacional de suelos
Deslizamiento planar	Deslizamiento de rocas	Deslizamiento de detritos	Coladas de barro
Flujos	Flujo de rocas	Flujo de detritos	Flujos de tierra arena o suelo
Expansión lateral	Expansiones laterales en rocas	Expansiones laterales en detritos	Expansiones laterales en suelos
Complejo	Ejemplo: Alud de rocas	Ejemplo: Flujo deslizante	Ejemplo: Rotación con flujo de tierra

Martha *et al*., (2010) consideran que de todos los tipos de procesos de remoción en masa, los movimientos de rocas de tipo traslacional y rotacional, los flujos de detritos y los movimientos de rocas traslacional superficial son los más importantes dada su frecuencia de ocurrencia, en el contexto de la evaluación del riesgo por procesos de remoción en masa.

Desprendimientos o caídas

Los desprendimientos o caídas (Figura 6-A), son los movimientos en caída libre de distintos materiales tales como rocas, detritos o suelos. Este tipo de movimiento se origina por el desprendimiento del material de una superficie fuertemente inclinada, el cual posteriormente puede rebotar, rodar, deslizarse o fluir ladera abajo. La velocidad de estos movimientos puede ser rápida o extremadamente rápida, a excepción si la masa desplazada sufre socavamiento o incisión, y el desprendimiento o caída es precedido por deslizamientos o vuelcos que separan el material desplazado de la masa intacta (Cruden y Varnes, 1996).

Vuelcos o desplomes

Un vuelco o desplome (Figura 6-B), consiste en la rotación de una masa de suelo, detritos o roca en torno a un eje o pivote determinado por su centro de gravedad. Su movimiento es hacia fuera, hacia la parte externa. Involucra basculamiento o inclinación, pero no implica colapso. Frecuentemente ocurre en una o más superficies, en materiales que poseen un sistema de discontinuidades preferencial como diaclasas, grietas de tension o superficies columnares. Se clasifican en vuelcos o desplomes de rocas, de derrubios o detritos y de suelos.

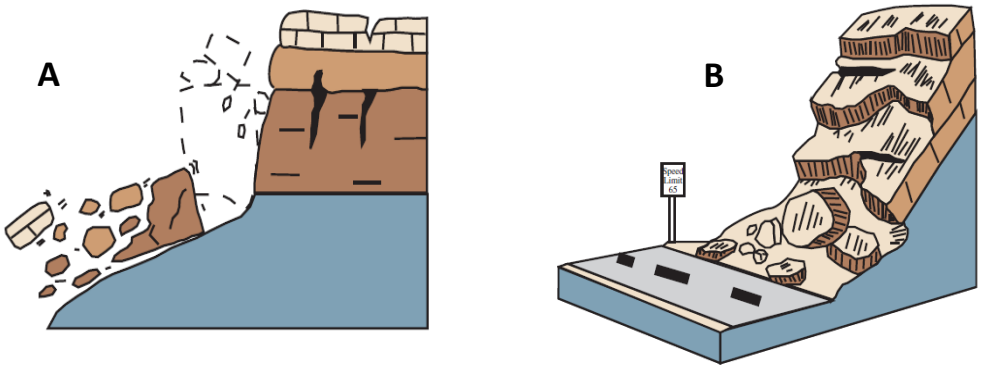


Figura 6. Movimientos en masa. A) Desprendimiento ó caída de material. B) Vuelco ó desplome de material. En ambos casos, se observa la caída y desplome de rocas (USGS, 2004)

Deslizamientos

Los deslizamientos (Figura 7), son movimientos ladera abajo de una masa de suelo, detritos o roca, la cual ocurre sobre una superficie de ruptura reconocible. La superficie de rotura define el tipo de deslizamiento, por lo que las superficies curvas, cóncavas o en forma de cuchara se asocian a deslizamientos rotacionales, las superficies de rupturas semiplanas u onduladas, a los movimientos traslacionales y las superficies planas se relacionan a los deslizamientos planos (Martha *et al*., 2010).

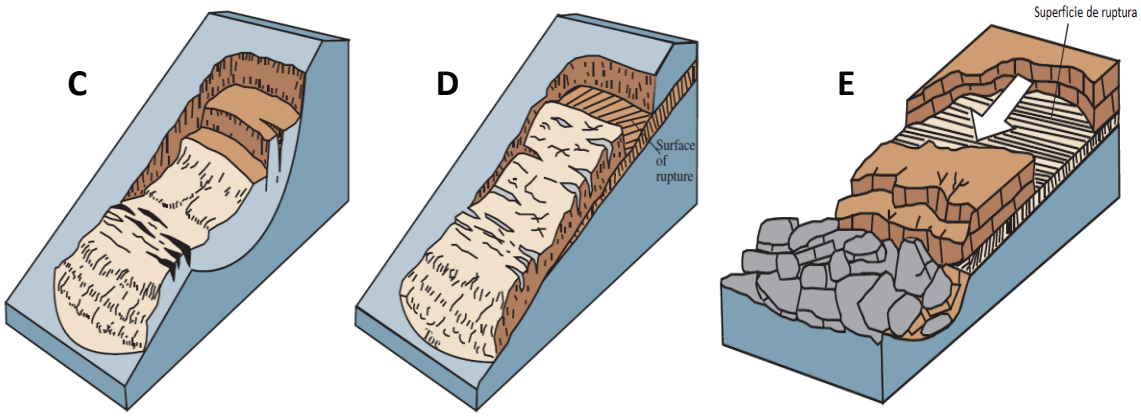


Figura 7. Tipos de deslizamientos. C) Deslizamiento Rotacional; D) Deslizamiento traslacional y, E) Deslizamiento de bloques (USGS, 2004).

Flujos

Los flujos (Figura 8), son movimientos espacialmente continuos, en los cuales las superficies de cizalla son muy próximas, de poca duración y, por consiguiente, difíciles de observar. En los flujos, la distribución de velocidades no es homogénea y se originan lóbulos a partir del predominio del movimiento inter-granular. Los flujos involucran todos los tipos de materiales disponibles y se clasifican en función de su contenido, por lo tanto, se dividen en flujos de rocas, flujos o corrientes de derrubios y flujos de arena o suelo.

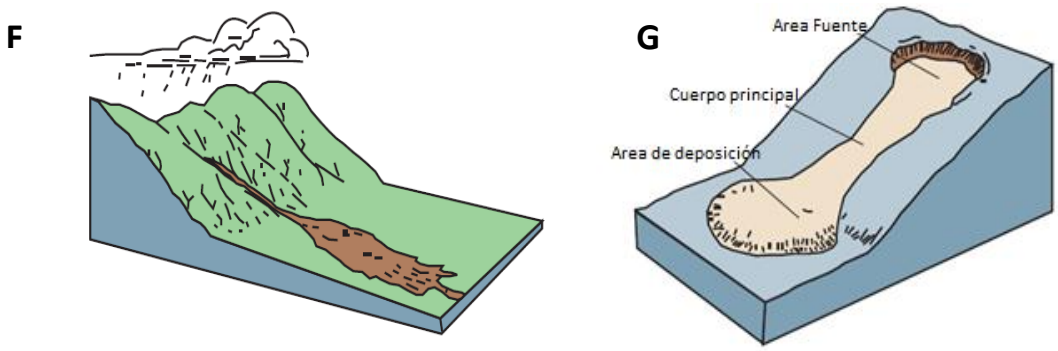


Figura 8. Tipos de Flujos. F) Flujo de detritos; G) Flujo de suelo (USGS, 2004).

Expansiones laterales

Estos movimientos (Figura 9), resultan de la fractura y expansión de suelos o masas de roca compactos, debido a la licuefacción o fluidificación del material subyacente. Ocurren cuando materiales gruesos, como fragmentos de rocas, grava, etc., están inmersos en una matriz de material más fino o que contienen arcillas. Estos tipos de movimientos ocurren principalmente en ambientes lacustres y marinos de poca profundidad, los cuales se localizan en los márgenes de los antiguos casquetes de hielo en las costas de Noruega, Alaska y Canadá. Los flujos pueden ser desencadenados por movimientos rotacionales o por efectos sísmicos.

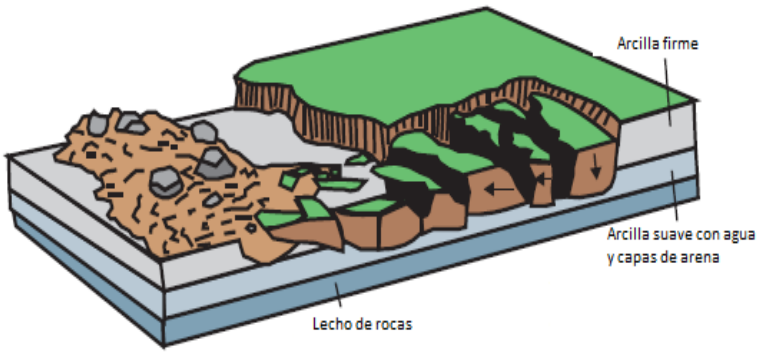


Figura 9. Expansiones laterales (USGS, 2004).

Movimientos complejos

Los movimientos complejos ocurren cuando el tipo de movimiento inicial se transforma en otro al ir desplazándose ladera abajo. Entre los más importantes cabe destacar los aludes o avalanchas de rocas y los flujos deslizantes. Las avalanchas o aludes de rocas consisten en la movilización, a gran distancia, de grandes masas de rocas y detritos, las cuales viajan a gran velocidad. Los flujos deslizantes son resultado del colapso repentino y de gran extensión de una masa de material granular o de detritos que viajan a velocidades rápidas o extremadamente rápidas, como resultado de un efecto perturbador. Por lo general, la morfología resultante es alargada y estrecha, y el área de depósito tiene un espesor relativamente bajo.

1.2.3. Factores Condicionantes y Desencadenantes

Los procesos de remoción en masa, se producen por un incremento de las fuerzas desestabilizadoras y/o por una reducción en la resistencia de los materiales implicados. Los factores que controlan los movimientos de ladera en general son aquellos capaces de modificar las fuerzas internas y externas que actúan sobre el terreno (Seisdedos Santos, 2009).

Los factores condicionantes o pasivos, son aquellos que dependen de la naturaleza, estructura y forma del terreno, tales como: las condiciones topográficas, litológicas, hidrogeológicas, los estados tenso-deformacionales, el grado de alteración o meteorización de los materiales y cobertura vegetal; mientras que los *factores desencadenantes o activos*, son considerados acciones externas, que provocan inestabilidad y desencadenan movimientos en masa al modificar las condiciones preexistentes. Estos son: precipitaciones, sismicidad, terremotos y vibraciones, erosión, agrietamiento por resequedad del suelo, factores antrópicos (Seisdedos Santos, 2009; Herrera *et al.*, 2011).

1.2.4. Mapa Inventario de procesos de remoción en masa

El análisis de peligrosidad y manejo del riesgo por procesos de remoción en masa, comienza por la detección y mapeo exhaustivo de los mismos, lo cual sirve de base para el entendimiento de su ocurrencia espacial y temporal (Carrara and Merenda, 1976; Guzetti *et al*., 2000; Brardioni *et al.*, 2003; Martha *et al*., 2010). En éste sentido, una buena aproximación para evaluar la magnitud de

un evento de procesos de remoción en masa en un área determinada, puede obtenerse a partir de un mapa inventario, el cual es una simple forma de identificar dichos procesos (Guzzetti *et al.* 1999). Así, un mapa inventario permite conocer la localización y cuando se sabe, la fecha de ocurrencia y tipos de movimientos que han dejado una huella discernible en un área (Bruce *et al.* 2004; Guzzetti *et al*., 2006).

Por lo general, a éstos inventarios se los describe en dos clases: ***(1)*** *Inventarios de evento,* que están asociados a un factor desencadenante; y ***(2)*** *Inventarios históricos* (geomorfológicos) o también llamados "multitemporales", que son la suma de uno o muchos eventos de movimientos en masa en una región en el tiempo. Un *inventario de evento*, reúne los procesos de remoción en masa "frescos" y puede ser substancialmente completo si el mapeo detallado fue realizado un tiempo después, muy próximo al evento. Un *inventario histórico* incluye eventos que ocurrieron en varios períodos de tiempo. Una característica de éste tipo de inventario es que la evidencia de la existencia de muchos de los movimientos más pequeños puede haberse perdido, debido a varios grados de modificación por procesos erosivos, influencia antrópica, movimientos de laderas subsecuentes y procesos de sucesión vegetal. Así, toda evidencia de movimientos pequeños tiende a perderse y los bordes de los mismos se vuelven más difíciles de distinguir con el paso del tiempo (Malamud *et al*., 2004). Se entiende, en general, que futuros eventos ocurrirán bajo similares condiciones geo-ambientales que ocurrieron y dieron origen a los eventos del pasado. De ésta manera, los datos retrospectivos pueden ser usados como "muestras de entrenamiento", para determinar las áreas con alta probabilidad de sufrir futuros eventos. Igualmente, un mapa de distribución de movimientos en masa, inclusive de eventos pasados, puede ser considerado una variable importante, dado que muestra la distribución del fenómeno que se pretende predecir (Carrara *et al.*, 1992; van Westen, 1993).

1.2.5. Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica aplicados al estudio de los procesos de remoción en masa

Los procesos de remoción en masa presentan ciertas características en común que posibilitan su identificación, a través de las cicatrices que dejan en las imágenes satelitales (Mantovani *et al*., 1996; Zinck *et al*., 2001; Marcelino, 2004). Estas características incluyen: un origen definido por la superficie de ruptura, un cuerpo principal y una zona de depósito (Figura 10) (Dai and Lee, 2002). Así, las imágenes obtenidas poco tiempo después de un evento, permiten obtener un alto contraste entre las zonas afectadas por los procesos de remoción en masa y los alrededores estables, resultando en cambios detectables, tanto espaciales como espectrales (Van Westen *et al*., 2008).

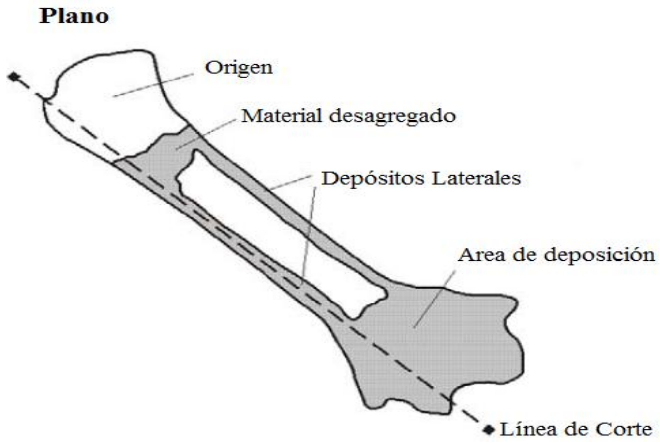


Figura 10. Características generales de un proceso de remoción en masa (Marcelino, 2004).

En los últimos veinte años, los Sensores Remotos y los Sistemas de Información Geográfica (SIG), se han convertido en herramientas útiles para la identificación y mapeo de los procesos de remoción en masa y para la evaluación del riesgo asociado (Nagarajan *et al.*, 1998; Liu *et al.*, 2004; Bathrellos *et al*., 2009), dado que permiten la extracción, almacenamiento y procesamiento rápido de la información (McKean *et al*., 1991; McDermid and Franklin, 1994; Carrara *et al*., 1995; Dikau *et al.*, 1996; van Westen *et al*., 1997; Carrara *et al*., 1999; Guzzetti *et al*., 2006). En éste sentido, los Sistemas de Información Geográfica, contribuyen a la integración y modelización espacial de datos provenientes de fuentes diversas, y además permite explorar relaciones de causa-efecto (van Westen y Soeters, 2000).

Inicialmente las fotos aéreas jugaron un papel importante en el estudio de los movimientos en masa, sin embargo aunque éstas representan detalles importantes de los movimientos, frecuentemente no están disponibles en forma oportuna para la mayor parte de las zonas vulnerables del mundo. Por esta razón, las imágenes satelitales se han convertido en una fuente alternativa de datos, dado que permiten una evaluación más económica de las grandes áreas afectadas por los procesos de remoción en masa, facilitan una apreciación sinóptica del contexto dentro del cual ocurren los mismos, especialmente en términos de dinámicas de cobertura de la tierra (Borghuis *et al*., 2007; Martha *et al*., 2010) y además, permiten la cobertura de áreas que resultan, a veces, de difícil acceso y de naturaleza peligrosa, como por ejemplo muchas zonas en las que se localizan algunos procesos de remoción en masa. Asimismo, posibilitan la obtención continua de datos de la misma área donde ocurrió un evento de movimientos en masa, permitiendo así el monitoreo temporal y espacial de tales procesos. La interpretación secuencial de imágenes dá lugar al análisis de la correlación entre los eventos climáticos y la ocurrencia e intensidad de los procesos de remoción en masa (Van Westen *et al*., 2008).

Imágenes con diferentes resoluciones tanto espectral como espacial y diferentes técnicas, se han usado para el reconocimiento y mapeo de los movimientos de laderas (Fernández *et al.*, 2008). Por ejemplo, las imágenes ópticas monoscópicas de alta resolución (HR, por sus siglas en inglés), poseen una resolución en el rango de 1-4 m (pancromática) y 4-30 m (multiespectral) y las imágenes de muy alta resolución (VHR, por sus siglas en inglés), tienen una resolución espacial menor a 1 m (pancromática) y menor a 4 m (multiespectral) (European Commission, 2010). Ambas, permiten detectar movimientos individuales ó grupos de ellos (Marcelino, 2009). En los casos en que estén disponibles imágenes ópticas de satélite pre y post-evento, las técnicas de detección de cambio, pueden ser usadas para identificar las áreas afectadas por los procesos de remoción en masa (Mantovani *et al*., 1996; Nichol and Wong, 2005). Otras técnicas de teledetección basadas en la utilización de información multiespectral también pueden usarse (composiciones en color, índices, análisis de componentes principales y clasificación digital) y análisis texturales (filtros y segmentación de imágenes) (Fernández *et al.,* 2010). Las imágenes adquiridas por Radar de Apertura Sintética (SAR, por sus siglas en inglés), también hacen su aporte a la detección de los movimientos (Czchlewsky *et al*., 2003; Singhroy and Molch, 2004). Asimismo, la Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR, por sus siglas en inglés)

basados en modelos de elevación digital (DEMs), ha demostrado su utilidad en éste campo (Singhroy *et al.*, 1998; Van Den Eeckhaut *et al.*, 2007).

La compilación de los mapas inventarios de movimientos en masa, ha sido posible mediante la interpretación estereoscópica de fotografías aéreas tomadas luego de producido un evento (Buchnam *et al*., 2001; Cardinalli *et al.*, 2001; Guzzetti *et al*., 2005); análisis visual ó digital de Modelos de Elevación Digital (DEMs) de alta resolución obtenidos de sensores aerotransportados (Mckeana and Roering, 2004; Ardizzone *et al.*, 2007; Corsini *et al*., 2007; Schulz, 2007; Van Den Eeckaut *et al*., 2007; Kasai *et al*., 2009), e investigaciones de reconocimiento en campo (Dappor- *et al*., 2005; Cardinalli *et al*., 2006; Mahdavifar *et al*. 2006; Santangelo *et al*., 2010). Hasta hace poco, la interpretación visual de fotografías aéreas combinadas con investigaciones de campo resultaron ser la mejor fuente de información para la preparación de los mapas inventarios (Kääb, 2002; Casson *et al.*, 2003; van Westen and Lulie Getahum, 2003; Granica *et al*., 2007; Moine *et al*., 2009; Guzzetti *et al*. 2012). Otras aproximaciones aunque poco frecuentes, incluyen las imágenes de relieve sombreado producida por Light Detection and Ranging (LIDAR, por sus siglas en inglés).

1.3. Susceptibilidad, Peligrosidad y Riesgo por procesos de remoción en masa

Los conceptos de susceptibilidad, peligrosidad y riesgo por procesos de remoción en masa se encuentran íntimamente relacionados. La susceptibilidad es uno de los parámetros que permite definir la peligrosidad.

Guzzetti *et al*., (2005), propusieron un modelo probabilístico para la evaluación de peligrosidad por procesos de remoción en masa, basado en la definición dada por Guzzetti *et al*., (1999), quienes definieron la peligrosidad por movimientos en masa como: "*la probabilidad de ocurrencia de procesos de remoción en masa potencialmente peligrosos de una determinada magnitud, en un período específico y en una determinada área*". En términos matemáticos, la definición de peligrosidad, puede ser escrita como:

$$\boldsymbol{H_L} = P\,[A_L \geq a_L \text{ en un intervalo de tiempo t, dado } \{\text{morfología, litología, estructura, usos de la tierra,}\ldots\}] \qquad \textbf{(2)}$$

donde A_L es el área de un movimiento de ladera mayor ó igual al mínimo tamaño a_L (medido por ejemplo, en m^2).

Para cualquier área dada, la ecuación ***(2)*** puede ser escrita como:

$$\boldsymbol{H_L = P\,(A_L) \times P\,(N_L) \times P\,(S)} \qquad \textbf{(3)}$$

que expresa la peligrosidad por procesos de remoción en masa $\boldsymbol{H_L}$, como la probabilidad condicional de su tamaño $P(A_L)$ (cuán grande ó destructivos pueden llegar a ser); la probabilidad de ocurrencia temporal $P(N_L)$ (qué tan frecuentes son)*;* y la probabilidad espacial $P(S)$ (qué superficie ocupan), dado un conjunto de condiciones ambientales locales.
La ecuación ***(3)*** asume independencia de las tres probabilidades individuales (Guzzetti *et al.*, 2006). El parámetro $P(S)$ se lo obtiene a partir del mapa de susceptibilidad.

Una vez definida la peligrosidad, el riego por procesos de remoción en masa se puede establecer a través de la evaluación de la interacción entre la vulnerabilidad y peligrosidad (Sección 1.1.2) El Riesgo es la probabilidad de pérdida -que puede ser medida en términos de daños a las

personas o a los bienes materiales-, como resultado de la interacción entre la peligrosidad asociada a un evento de procesos de remoción en masa y las condiciones locales de vulnerabilidad (Figura 11) (Crozier y Glade, 2005).

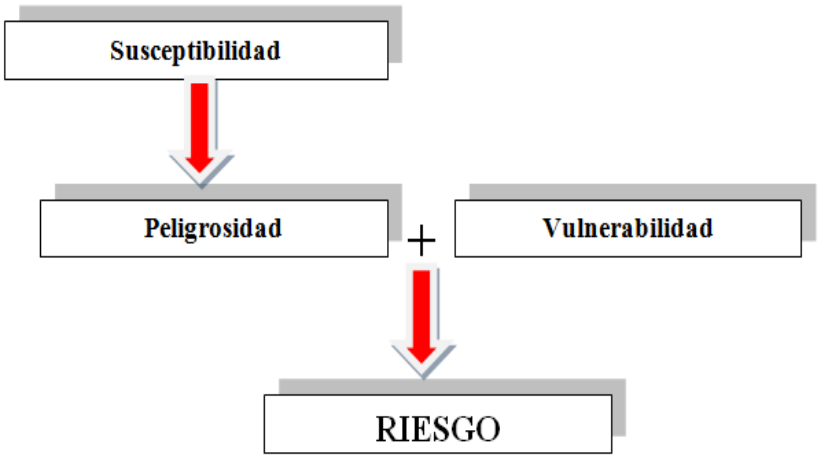


Figura 11. Relación conceptual entre susceptibilidad, peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo. Ver texto para mayor detalle

Este trabajo de tesis, se enfoca en la evaluación de la susceptibilidad por procesos de remoción en masa en la cuenca del río Tartagal.

1.3.1. Mapa de Zonación de Susceptibilidad

La identificación y zonación de la susceptibilidad forman parte de las primeras y más importantes labores en el contexto de la prevención y mitigación en la gestión del riego (Suárez *et al*., 2009). El término "*zonación*" en sentido general, implica una división del terreno en áreas y su clasificación de acuerdo a los grados del actual ó potencial peligro o susceptibilidad por movimientos en masa (Varnes, 1984).

El análisis de susceptibilidad es considerado un análisis espacial (Corominas *et al*., 2003). La "*susceptibilidad*", es el grado en el cual un área puede ser afectada por futuros movimientos; una estimación de "dónde" podrían ocurrir éstos movimientos (Guzzetti *et al.* 1999; 2005; 2006; 2009). En lenguaje matemático, la susceptibilidad es la probabilidad de ocurrencia espacial

(geográfica) de fallas, dado un conjunto de condiciones geo-ambientales (Chung and Fabbri, 2003; Guzzetti *et al.*, 2005; 2006). Es de destacar que el concepto de susceptibilidad, no considera la probabilidad temporal ni la magnitud de los movimientos en masa esperados (por ejemplo, cuán grande o destructiva será la falla) (Guzzetti *et al.*, 2009).

El mapa de susceptibilidad es fundamental para los planificadores, dado que permite elaborar medidas de prevención y direccionar las políticas públicas para la regulación de las formas de usos y ocupación de la tierra (Ahmad and McCalpin, 1999) y prevenir el riesgo de los movimientos en masa (Bathrellos *et al*., 2009). De acuerdo a Parise (2001), este tipo de mapa permite definir los niveles de ocurrencia potencial de procesos de remoción en masa para un área determinada. Los mapas de susceptibilidad exhiben un modelo conceptual común que consiste en: ***(1)*** un mapeo de procesos de remoción en masa (inventario); ***(2)*** un mapeo de los factores geoambientales que influencian directa ó indirectamente en la estabilidad de las pendientes (Factores de inestabilidad); ***(3)*** la selección de un tipo de ponderación de todos los factores de inestabilidad y de las clases para cada factor; ***(4)*** el establecimiento de una correlación entre los factores geoambientales (litología, pendientes, aspecto, etc.) y los movimientos de laderas antiguos y recientes; y ***(5)*** la clasificación de las unidades del paisaje en diferentes grados de susceptibilidad con base en las relaciones identificadas (Anbalagan and Singh, 1996; Guzzetti *et al.*, 1999; Dai *et al.*, 2002; Clerici *et al*., (2002). Así la elaboración de éste tipo de mapa, tiene un punto de partida en el mapa inventario de movimientos en masa donde se analizan las condiciones de las áreas en las cuales ocurren tales movimientos. Después, se obtienen los mapas temáticos que contienen información sobre la geología, geomorfología, edafología, uso de la tierra, entre otros (Marcelino, 2004). Posteriormente, en un entorno SIG se realiza la superposición de éstos mapas, definiendo las zonas de susceptibilidad, donde son identificados los grados de tendencia a la ocurrencia de los procesos de remoción en masa (Fernándes *et al*., 2008; Parise, 2001; Clerici *et al*., 2002; Marcelino, 2004; Guzzetti *et al*., 2006).

1.3.2. Métodos de mapeo de áreas susceptibles

Existen diferentes formas de realizar el mapeo de las áreas susceptibles por procesos de remoción en masa. De hecho, la identificación de tales movimientos es considerada en sí misma un mapeo de áreas susceptibles -teniendo en cuenta que futuros movimientos de laderas tienen alta probabilidad de ocurrir donde ya ocurrieron en el pasado- (Crozier y Glade, 2005). Sin embargo, en los últimos años hubo grandes progresos en la investigación y documentación de otros métodos, tales como: los estadísticos, heurísticos y determinísticos (van Westen *et al.,* 1999; Guzzetti *et al.,* 1999), en virtud de la necesidad de información que pueda ser usada por los planificadores para minimizar los impactos socioeconómicos ocasionados por éstos fenómenos (Guzzetti *et al*., 1999; Parise, 2001).

1.3.2.1. Método Heurístico

El *método heurístico*, según van Westen *et al*., (1997) es el más subjetivo de todos ya que un especialista es el que decide el tipo ó grado de riesgo para una zona en cuestión, utilizando la asignación directa o indirecta. Así, dos tipos de análisis heurísticos pueden distinguirse: *(1)* el *análisis geomorfológico* y, *(2)* la *combinación cualitativa de mapas*. En el primero, conocido también como método de cartografía directa, el grado de susceptibilidad del terreno es determinado directamente en el campo en base al conocimiento y experiencia del investigador. Los criterios aplicados son, por lo tanto, difíciles de definir, ya que varían según el sitio estudiado (Segura *et al.*, 2009). En el segundo, se busca superar el problema de los "criterios ocultos" del análisis geomorfológico. En éste método, el científico usa su criterio experto para asignar pesos (valores que representan un determinado grado de importancia) a una serie de mapas parámetro (mapas de factores condicionantes que se consideran relacionados con la ocurrencia de movimientos de laderas). Tales factores se suman de acuerdo con éstos pesos, dando como resultado valores de susceptibilidad que pueden ser agrupados en categorías ó clases.

1.3.2.2. Método Determinístico

El *método determinístico*, tiene como base a los modelos hidrológicos y de estabilidad que consideran la información detallada de las pendientes fundadas en la mecánica de suelos. Éste método busca eliminar la subjetividad cuantificando los grados de riesgo en valores absolutos, como por ejemplo a través del factor de seguridad (Safety Factor) (Barredo *et al*., 2000). Una

gran ventaja de éste método es el alto grado de simplificación, principalmente para mapeos de escala media y regional, debido a la gran variabilidad de los parámetros geotécnicos. De ésta forma, el desempeño del método depende totalmente de la calidad y cantidad de los datos colectados (van Westen *et al*., 1997; Fernándes *et al*., 2001; Dai *et al*., 2002). Según Dai And Lee (2002), éste tipo de abordaje debe ser empleado cuando las condiciones del terreno son relativamente uniformes y la tipología de los procesos de remoción en masa es bien conocida y fácilmente analizable.

1.3.2.3. Método Estadístico

Según Carrara *et al*., (1995); van Westen *et al*., (1997) y Guzzetti *et al.*, (1999), el *método estadístico* tiene como principio la búsqueda de relaciones entre los factores condicionantes de inestabilidad (tales como litología, cobertura vegetal, uso del suelo, pendientes, etc.) y la distribución de los procesos de remoción en masa antiguos y recientes de un paisaje. A partir de la combinación estadística de éstos factores se determinan los grados de riesgo, asumiendo que los factores que causan inestabilidad para determinadas áreas serán los mismos que podrían generar movimientos futuros (Dai *et al.*, 2002). Esta técnica, se divide en dos análisis estadísticos principales: *(1) Análisis Multivariado* (considera para cada unidad, polígono ó píxel, la presencia ó ausencia de movimientos de laderas generándose una matriz de datos que es analizada en un soporte estadístico mediante regresión múltiple, análisis discriminante, etc.) y, *(2) Análisis Bivariado* (considera el peso de cada clase y de cada parámetro de análisis utilizando técnicas de inferencia como por ejemplo, Lógica difusa ó Fuzzy e Inferencia Bayesiana). Según Carrara *et al.*, (1995); van Westen *et al.*, (1997) y Dai and Lee (2002) la confiabilidad del método depende de la calidad y cantidad de los datos.

1.4. Objetivo General y Específicos

El objetivo general de la tesis es elaborar un mapa de zonación de susceptibilidad por procesos de remoción en masa en la cuenca del Río Tartagal, Salta (Argentina), mediante la utilización de técnicas de Sensores Remotos y SIG. Con este fin, se tomó como referencia el evento de procesos de remoción en masa del año 2009, que tuvo lugar en la cuenca alta y media del río homónimo y afectó a la ciudad y población de Tartagal.

A tal efecto, se abordaron los siguientes objetivos específicos:

1. Identificar y mapear los procesos de remoción en masa (Inventario).
2. Estimar el área afectada, volúmen movilizado y magnitud del evento.
3. Extraer parámetros topográficos, tales como pendiente, curvatura y aspecto a partir del DEM de 12.5 m de resolución espacial.
4. Elaborar mapas temáticos de un set de factores condicionantes, tales como: pendiente, curvatura, orientación, litología, cobertura vegetal y procesos de remoción en masa, que inciden en la ocurrencia de los procesos de remoción en masa.
5. Aplicar el Método Heurístico para determinar cómo influye el conjunto de factores condicionantes en la estabilidad de las laderas.

Cabe mencionar que los datos usados, se eligieron en base a un exhaustivo análisis de la bibliografía actual sobre el tema tratado y la disponibilidad de los mismos. La inclusión de más datos y/o factores excedería el alcance y tiempo de ejecución de éste proyecto.

Los resultados obtenidos en esta tesis aportarán una valiosa información, inexistente hasta el momento. En éste sentido, la identificación de las zonas más susceptibles; el conocimiento de la localización de los procesos de remoción en masa, la superficie de ocupación y volúmen de material movilizado aportarán información que servirá de base para futuros estudios de riesgo y análisis de peligrosidad. Teniendo en cuenta que la reducción de riesgos de desastres naturales es una cuestión transversal, que requiere un compromiso político, la inclusión de la comunidad y el conocimiento científico-técnico, se espera que los resultados que aquí se presentan sirvan a las autoridades tanto locales como nacionales para la formulación y aplicación de planes y estrategias de prevención y respuesta temprana ante riesgos de desastres, de manera de disminuir sus efectos perjudiciales.

Capítulo II

Área de Estudio

La cuenca del río Tartagal se encuentra localizada entre los 22° 32’ y 22° 25’ Latitud Sur y los 63° 55’ y 63° 43’ Longitud Oeste. Cubre una superficie de 90 km^2 aproximadamente y una cota mínima y máxima de 405 m y 1032 m respectivamente. Las pendientes muestran un rango entre los 0° y 81° (media=12°; SD=8°). La ciudad de Tartagal se encuentra ubicada en el sector bajo de la cuenca homónima, al pie de las Sierras Subandinas; pertenece al Departamento General San Martín, al noreste de la provincia de Salta, Argentina (Figura 12). En el año 2001 la población era de 56.308 habitantes (INDEC, 2001). Los procesos de remoción en masa son comunes en las Sierras Subandinas, en donde durante los últimos 50 años se han producido varios eventos que resultaron en numerosas muertes y pérdidas económicas en las comunidades de Tartagal y Vespucio, que viven al pie de las mismas.

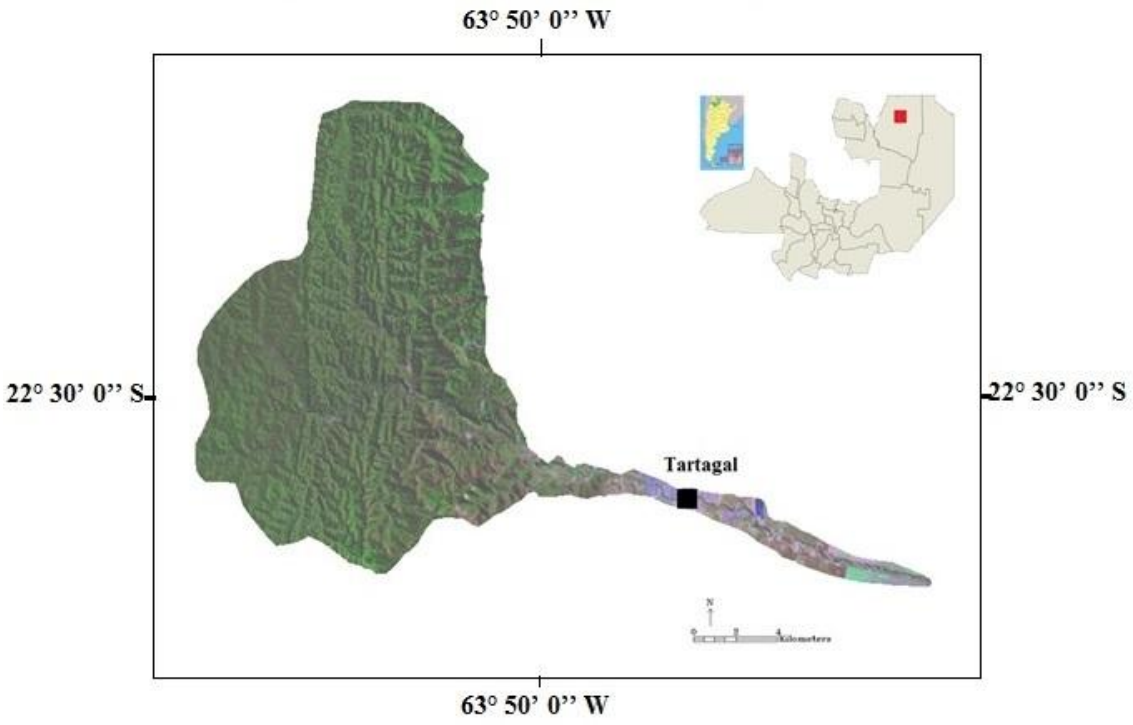


Figura 12. Localización de la cuenca del río Tartagal, en la provincia de Salta (Argentina), sobre una composición RGB: 431 de la imagen ASTER, de fecha 04/09/2004.

2.1. Caracterización Ambiental

2.1. 1. Geología

La estructura de la Sierra de Tartagal, está caracterizada por un anticlinal asimétrico de rumbo submeridiano y buzante hacia el sur. El núcleo del mismo aflora en la transición de la cuenca media a alta del río Tartagal y expone sedimentitas competentes del Paleozoico Superior. El flanco oriental presenta afloramientos de la Formación Tranquitas, de edad Miocena inferior a media, constituída por areniscas, areniscas calcáreas y pelitas medianamente competentes de colores grises a verdosos. La alta cuenca del río Tartagal y sus nacientes se encuentran sobre el flanco occidental del anticlinal donde los afloramientos son contínuos y completan la columna estratigráfica con extensos afloramientos del Terciario Subandino (Formaciones Tariquía, Guandacay y Emboruzú), integrados por areniscas conglomerádicas, areniscas medianas y pelitas con alto grado de erodabilidad y coloración general rojiza (Figura 13).

Los contrastes litológicos y fundamentalmente, de competencia entre las rocas aflorantes del paleozoico superior y las unidades terciarias se reflejan tanto en la estabilidad de las laderas como en el ancho del cauce del río. De ésta manera, los tramos conformados por rocas paleozoicas competentes muestran la mayor estabilidad en las laderas y valles encajonados y de segmentos rectos. Por otro lado, donde afloran las rocas terciarias las laderas son muy inestables, el río presenta alta sinuosidad y valles anchos. Cabe destacar, sin embargo que las zonas con mayores pendientes y alturas relativas se asocian a los sectores con afloramientos de rocas competentes, indicando posibles movimientos de masa locales. La ciudad de Tartagal se asienta sobre la zona apical del abanico aluvial del río homónimo, cuyo valle presenta una marcada incisión en el sector del canal principal integrado (Baumann *et al*., 2009).

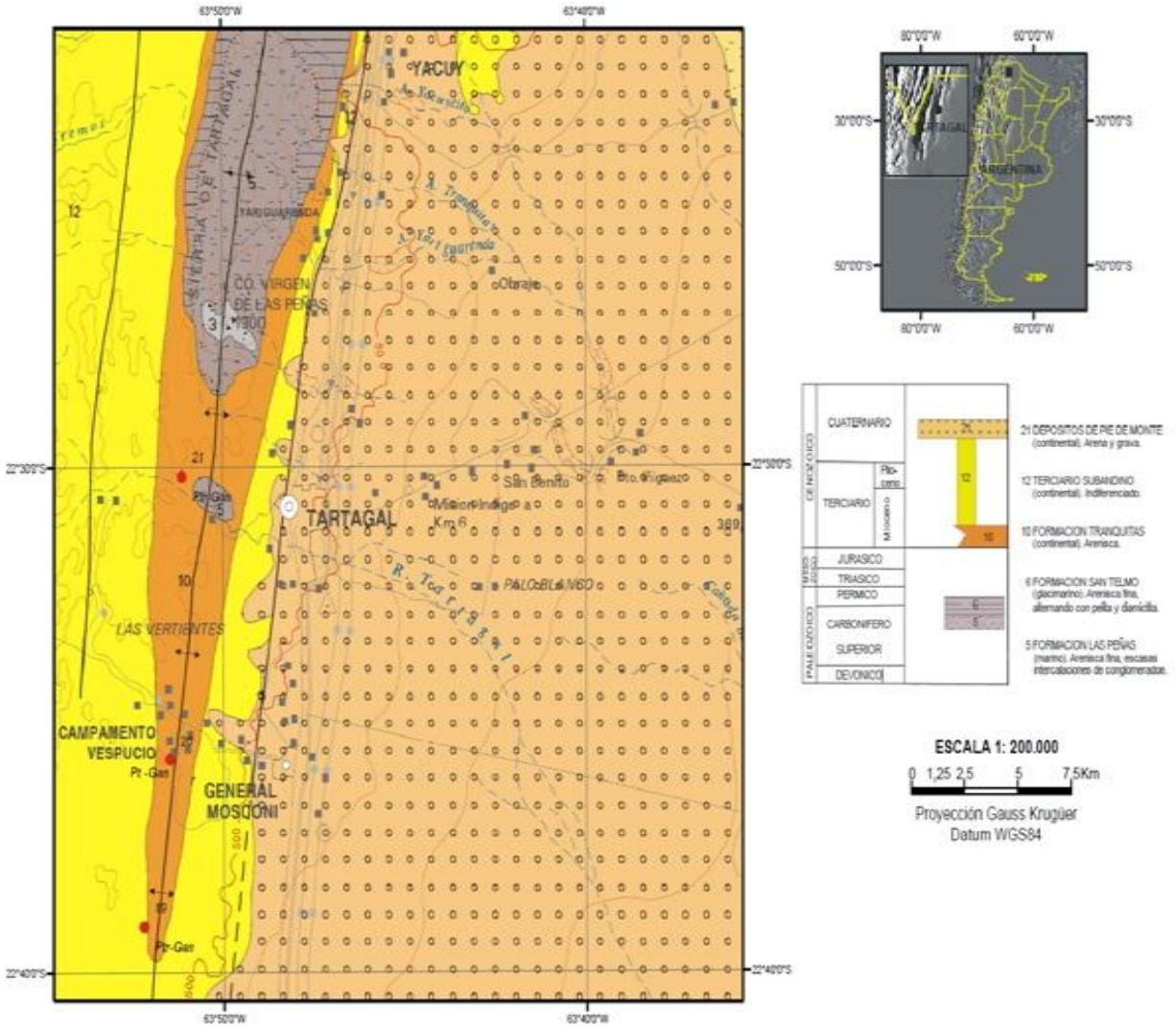


Figura 13. Mapa Geológico extraído de la Hoja Geológica 2363-I de Tartagal (escala 1: 200.000) (Bonorino *et al.*, 2001).

Las areniscas limosas y pelitas subordinadas del Terciario Subandino cubren la mayor parte de la cuenca, con pendientes máximas de 40°. Las máximas pendientes se localizan sobre todo en el Grupo Cuevo, Tacurú, Formación Tranquitas (Figura 14).

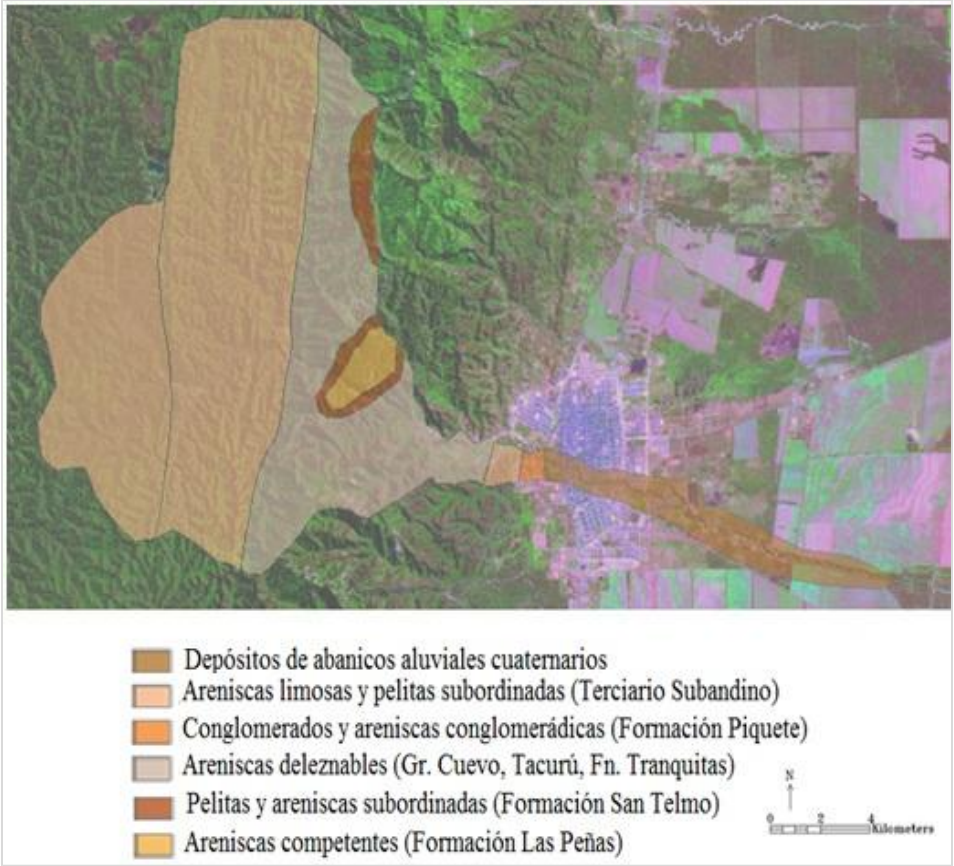


Figura 14.Mapa Litológico de la cuenca del río Tartagal (Salta, Argentina) sobre una composición RGB: 431 de la imagen ASTER, de fecha 04/09/2004.

2. 1. 2. Clima

La zona de estudio tiene un clima tropical serrano (Daus y García Gache, 1945). Esta variedad tropical se debe a la presencia de una serie de cordones montañosos orientados en el sentido de los meridianos que interceptan el paso de los vientos húmedos. La cuenca del río Tartagal y adyacencias, se caracteriza por los elevados valores térmicos con temperaturas medias anuales iguales o superiores a los 21 °C (Figura 15-A) (Volante *et al*., 2005; Sánchez, 2008). Las lluvias presentan un régimen monzónico (Volante *et al.*, 2005) con una estacionalidad concentrada principalmente entre diciembre y marzo. La media de precipitación registrada entre los años 1934-1990 para la localidad de Tartagal fue de 911 mm y la máxima de 1914 mm en el año 1984 (Cabral y Plaza, 2006).

Según Bianchi (un trabajo *inédito,* citado por Volante *et al.,* 2005), la precipitación anual oscila entre 800-1000 mm/año (Figura 15-B). La evapotranspiración potencial se encuentra entre 900-110 mm/año (Figura 15-C) y el balance hídrico entre 0 -200 (mm) (Figura 15-D).

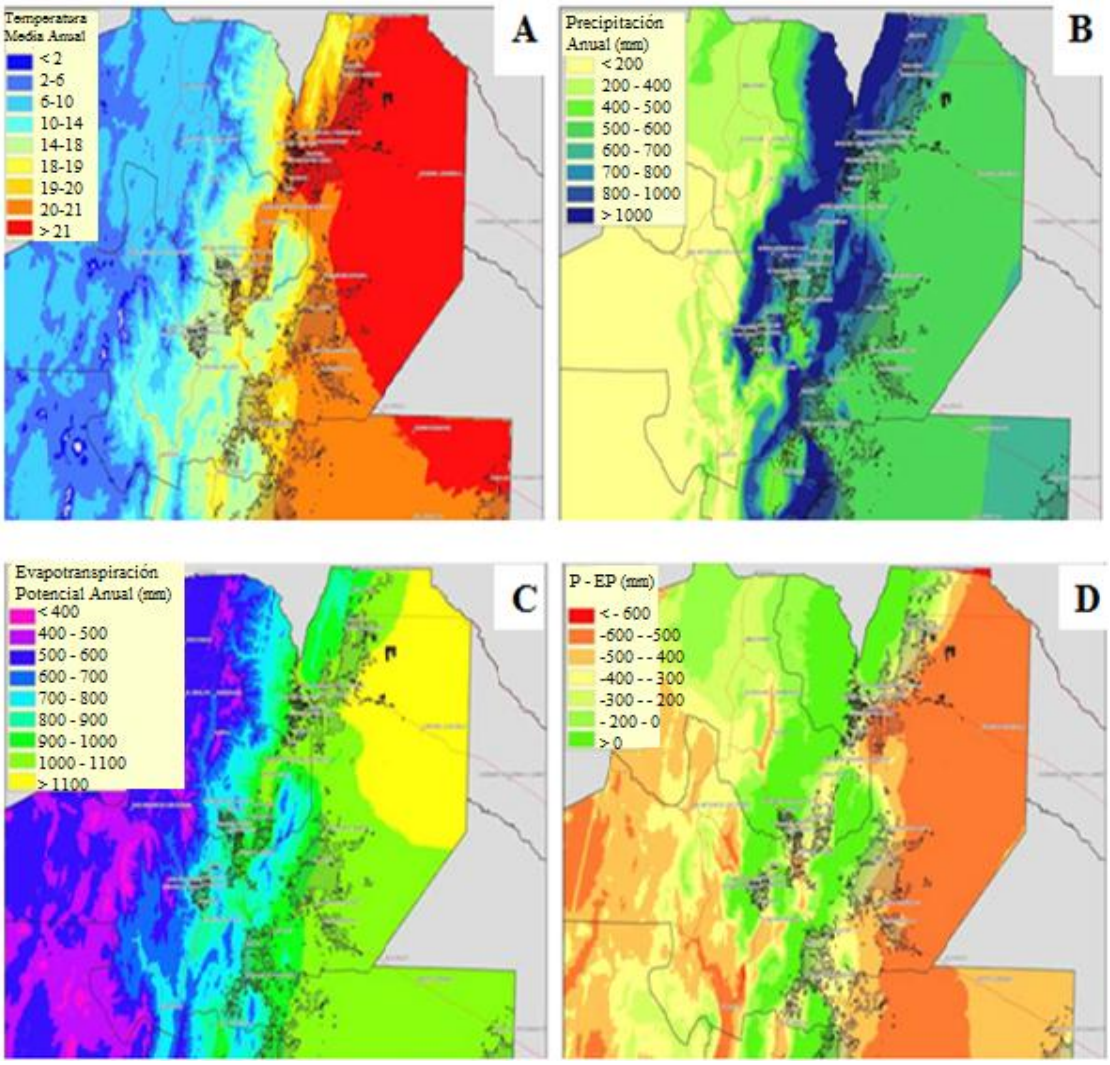


Figura 15. Representación de variables climáticas en la Provincia de Salta (promedio 1934-1990). A) Temperatura media anual (mm); B) Precipitación anual (mm); C) Evapotranspiración Potencial anual (mm); D) Balance Hídrico, BH = P (precipitación) – EP (evapotranspiración potencial) (Bianchi, *inédito*)

2. 1.3. Vegetación

El área de estudio se encuentra representado por las Selvas Subtropicales de Montaña, también denominadas "Yungas", "Selva tucumana-boliviana" o "Selva tucumano-Oranense". El bioma de las Yungas actualmente ocupa en Argentina unos 5.2 millones de hectáreas, extendiéndose desde la frontera con Bolivia (23° S) hasta el norte de la provincia de Catamarca (29° S), atravesando las provincias de Salta, Jujuy, Tucumán y Catamarca. Se extienden aproximadamente 600 km en sentido Norte-Sur, en un rango altitudinal que varía entre los 400 y 3000 m. s. n. m. (Figura 16) (Brouver *et a*l., 2006).

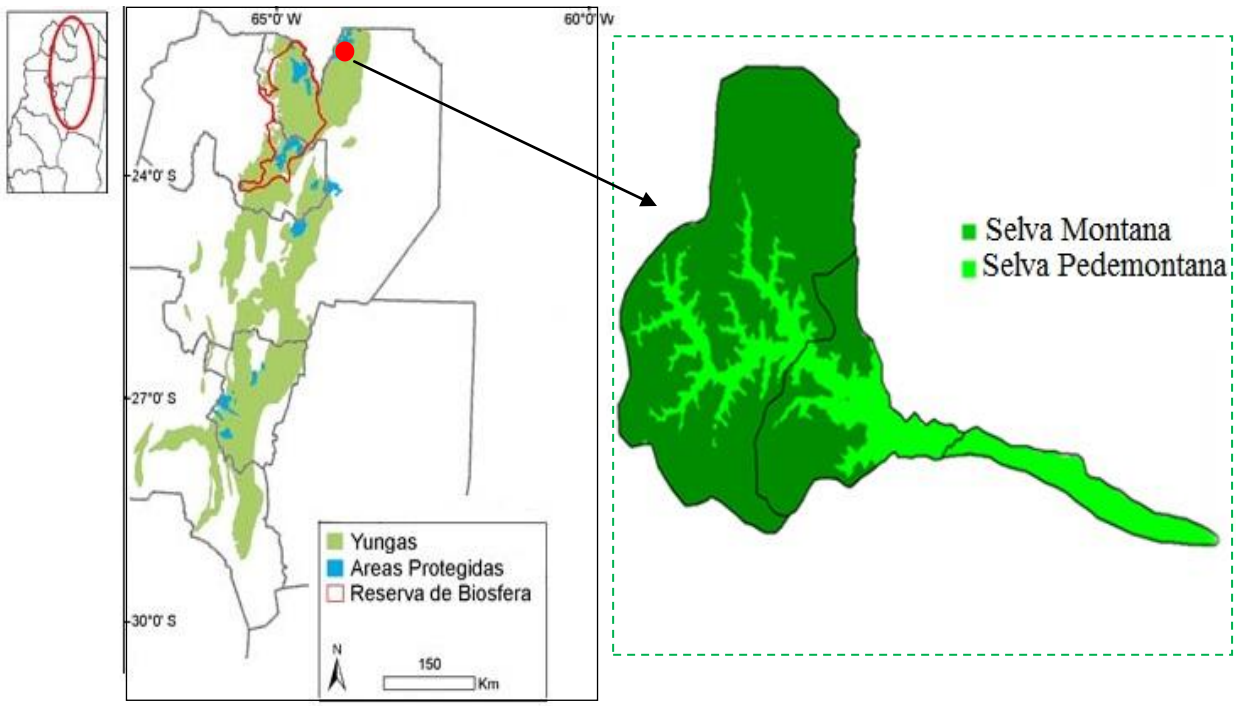


Figura 16. Distribución de los sectores de las "Yungas" en el Noroeste Argentino y en la cuenca del río Tartagal, Salta.

Las "Yungas", son denominadas también Selvas Nubladas, ya que su desarrollo ocurre debido a las lluvias orográficas. Esta región está cruzada por numerosas serranías orientadas principalmente de Norte a Sur, que interceptan los vientos húmedos del Atlántico y condensan la humedad en forma de lluvias orográficas, concentradas entre noviembre y abril (el 80% de las lluvias ocurren en la estación húmeda). Además se produce una precipitación horizontal en la estación seca (de mayo a octubre), resultado de la condensación de la neblina sobre las copas de los árboles (Plan de Ordenamiento Territorial Provincial, 2009).

Las Selvas Subtropicales de Montaña muestran un marcado cambio en su diversidad biológica (organizada en pisos o franjas), como consecuencia del gradiente de variación climática asociado al amplio rango de alturas que cubren. De esta manera albergan una gran biodiversidad tanto por su riqueza de especies como por el número de endemismos. Además poseen un valor como reservorio genético y regulador del suministro de agua para las poblaciones y el agro (Plan de Ordenamiento Territorial Provincial, 2009).

Los pisos o estratos característicos de este bioma son: ***(1)*** *Selva Pedemontana***,** ocupa los sectores entre los 400 y 700 m. s. n. m. en el pie de monte y serranías de escasa altitud. Se caracteriza por presentar árboles, arbustos, hierbas, lianas, enredaderas y epífitas; ***(2)*** *Selva Montana,* ocupa las laderas de las montañas entre los 700 y 1500 m.s.n.m. y representa la franja altitudinal de máximas precipitaciones pluviales. Las especies dominantes son de origen tropical con predominio de especies perennifolias y, ***(3)*** *Bosque Montano,* representa el piso ecológico de los "bosques nublados" propiamente dichos, situado entre los 1500 y 2500-3000 m.s.n.m. Limita en su parte superior con los pastizales de neblina y forman un paisaje de alta heterogeneidad estructural, dada por bosques en distintos estadíos sucesionales. Los pisos altitudinales de la Selva pedemontana y montana se localizan en la cuenca bajo estudio.

2.2. Población y Usos del suelo

En Tartagal se evidencia un crecimiento sostenido de la población a lo largo de los últimos 40 años. Entre los años 1991 y 2001 se registró un incremento poblacional del 29.2 % (INDEC, 2001). La composición social de Tartagal se caracteriza por su diversidad cultural. Están presentes etnias aborígenes y criollos. El componente migratorio tiene un gran efecto, ya que por su cercanía a Bolivia, un alto porcentaje de su población es de origen boliviano.

A lo largo de la ruta 86 (Departamento General San Martín), se encuentran las comunidades Wichí. Se estima que en el año 2008, la población estaba formada por 624 personas, distribuídas en 13 comunidades y ocupaban una superficie cercana a las 183.000 hectáreas. El territorio en el que se encuentran ha sido extensamente afectado por la frontera agroindustrial, es así que más de 53.000 hectáreas (29 % del territorio) fueron desmontadas hasta la fecha. También sobre la Ruta Nacional 34, entre las ciudades de Embarcación y Tartagal hay cinco comunidades Wíchi, organizadas en 146 familias que ocupan un predio de 93 hectáreas (Sayago, 1992). Existen otras comunidades indígenas Wichí que tienen influencia en la cuenca del río Tartagal y ocupan un área de aproximadamente 324.000 hectáreas. A pesar de que ellos hacen uso de los bosques nativos para su subsistencia y el mantenimiento de su identidad cultural, el territorio es uno de los que más ha sido afectado por la deforestación. (Fundapaz, 2008).

Un mapa del siglo XIX -presentado oficialmente por la provincia de Salta en la Exposición de Chicago en 1892- (Figura 17), muestra la antigua Finca Tartagal, perteneciente a don Manuel Antonio Peña. El mismo muestra que en ese tiempo la ciudad de Tartagal no existía y que toda la zona estaba desmontada. Los principales usos eran: superficies de cañaverales, rastrojos, potreros, corrales y huertos de naranjas (Alonso, 2012).

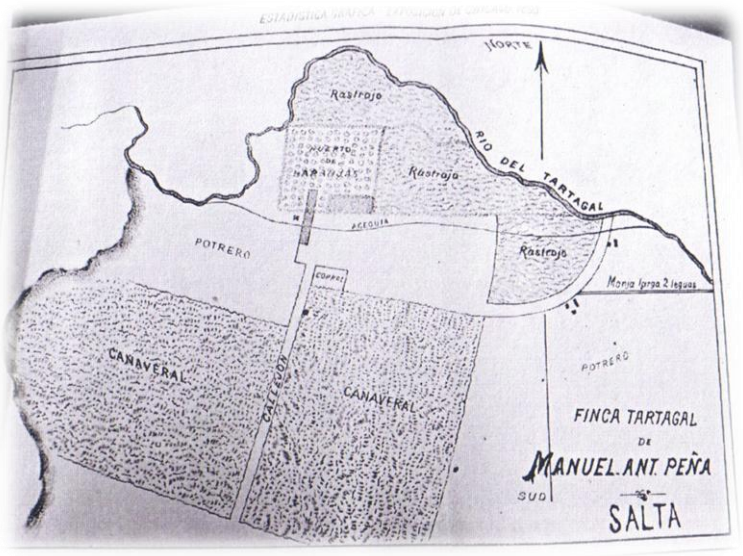


Figura 17. Mapa de la antigua Finca Tartagal, Salta (Argentina) (Alonso, 2012).

Según el Proyecto PRO.RE.NOA, llevado adelante por el INTA en 2005, el 91 % de la superficie agrícola extensiva del NOA se concentra en el denominado Umbral del Chaco, formado por varios departamentos y localidades de las provincias de Salta, Tucumán y Santiago del Estero, entre las cuales se encuentra Tartagal.

En la década de los años ’80, se produjo una transformación masiva de la frontera agrícola en los departamentos del este de la provincia de Salta: Anta y General San Martín. En el año 2008 se observó la persistencia de la expansión hacia el este de la cuenca baja del río Tartagal (Figura 18) (Plan de Ordenamiento Territorial Provincial, 2009).

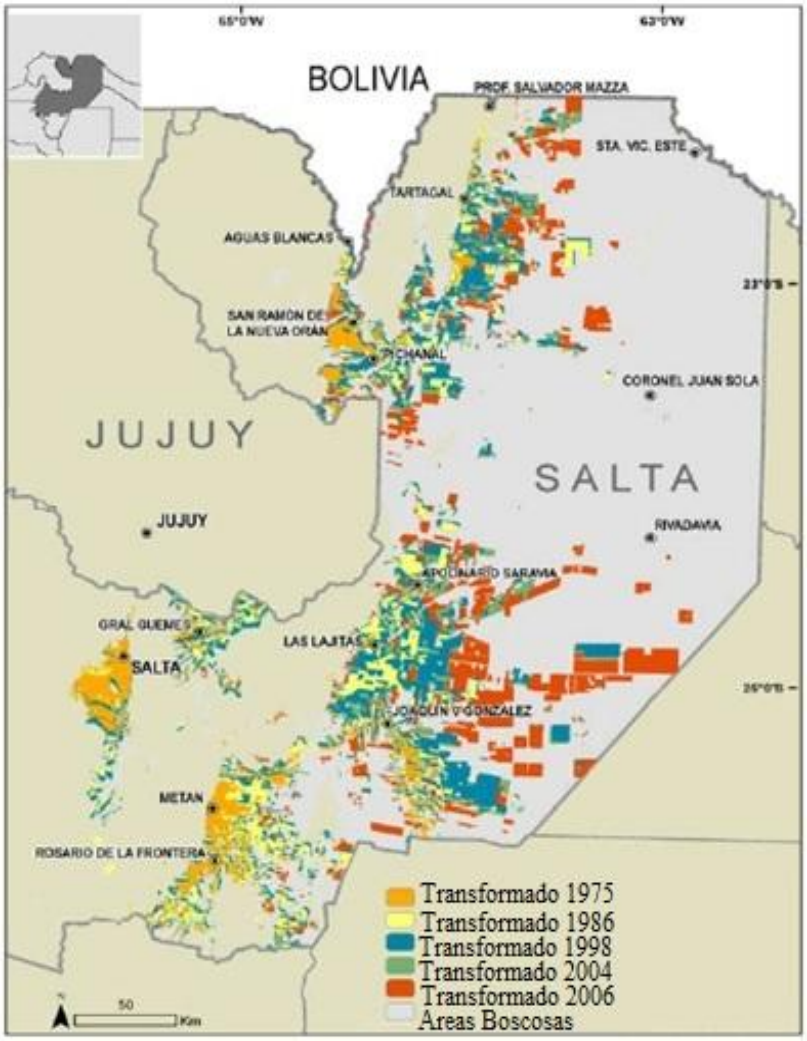


Figura 18. Distribución espacial de las tierras transformadas en la parte centro-este de la Provincia de Salta, en los años 1975, 1986, 1998, 2004 y 2008 (Plan de Ordenamientos Territorial, 2009).

El crecimiento de las áreas cultivadas en el período 2000-2005, se hizo a expensas de cambios en la ocupación del suelo a través de dos mecanismos: ***(1)*** incorporación de tierras a la agricultura por medio de desmontes y, ***(2)*** reemplazo de actividades (por ejemplo, reemplazo de ganadería por agricultura extensiva) (Volante *et al*., 2005).

El incremento de la superficie cultivada durante el verano del período 2000-2004, se produjo por los monocultivos de soja y poroto, registrándose un aumento de aproximadamente 1.400 ha en los departamentos de Anta y San Martín, ambos pertenecientes a la provincia de Salta (Volante *et al.*, 2005).

Esta situación continuó aún hasta el relevamiento del año 2009, inclusive en la zona de influencia de la cuenca baja del Río Tartagal (Figura 19) (Plan de Ordenamiento Territorial Provincial, 2009).

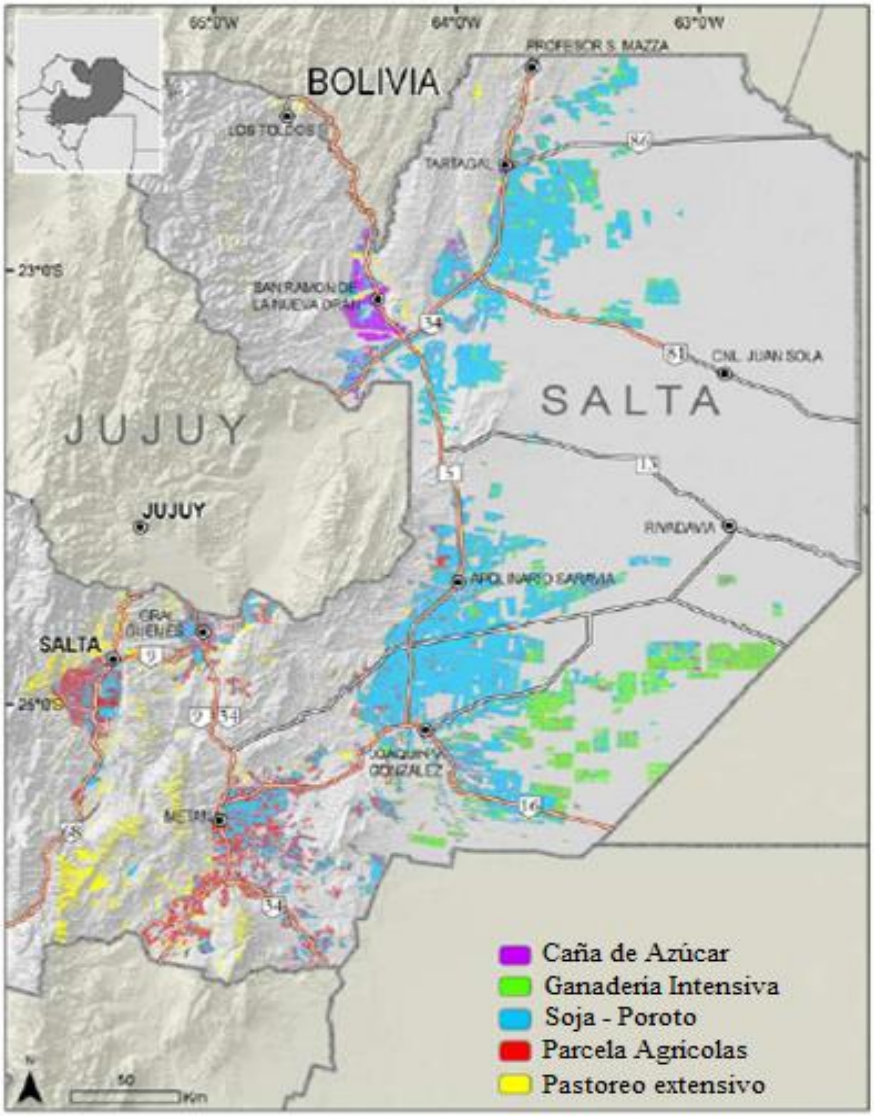


Figura 19. Categorías de las áreas transformadas en la Provincia de Salta (Plan de Ordenamiento Territorial, 2009).

2.3. El evento de procesos de remoción en masa de Febrero de 2009

Baumann *et al*., (2009) relatan que en la mañana del 09 de febrero de 2009, los pobladores de la ciudad de Tartagal se vieron afectados por una inundación de detritos que causó muertes, evacuados y grandes daños materiales en un sector de la ciudad.

Ese día, gran cantidad de sedimentos, ramas y troncos llegaron hasta el puente de la avenida principal de la ciudad, donde se produjo un endicamiento temporario y con el pasar del tiempo, el material se fue acumulando detrás del puente hasta que superó su nivel y finalmente desbordó hacia la ciudad (Figura 20). El volúmen de agua en movimiento alcanzó gran velocidad y ocasionó erosión y profundizó cárcavas en los laterales del río Tartagal, lo que afectó a las viviendas localizadas en las cercanías (Figura 21). La inundación de detritos que abordó la zona, rompió los caños de agua y cloacas que pasaban por el puente y dejó a gran cantidad de personas sin estos servicios fundamentales.

La zona urbana más afectada presentó un área de 0.4 km^2 aproximadamente. El agua llegó a 2 m sobre el nivel del suelo y se estimó un volúmen derramado de $6x10^6$ m^3 en el sector próximo al puente (Figura 22). En los sectores más alejados, cerca de la Ruta Nacional 34, el agua llegó a 30 cm y dejó un depósito de barro de alrededor de 5 cm. La inundación de detritos abarcó un área de aproximadamente 3 km^2, y el caudal alcanzado se estimó en 1,247 m^3/s y una velocidad de 7.47 m/s (Baumann *et al*., 2009).



Figura 20. Vista de los de sedimentos, ramas y troncos que llegaron desde la cuenca alta hasta el puente de la avenida principal de la ciudad de Tartagal, ubicada en la cuenca baja del río homónimo. Se observa el ancho del antiguo puente de ferrocarril (14 m) y del puente de la avenida (54 m). (Baumann *et al*,. 2009).



Figura 21. Vista de una de las cárcavas producidas por la erosión en el río Tartagal en el momento de la creciente (Baumann *et al*,. 2009).

El informe de la comisión enviada por el Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR) para este evento, sostiene que la Quebrada del Aguay (afluente de la margen derecha del río Tartagal), presentó numerosos movimientos en masa y profundización de cárcavas y quebradas laterales. En toda la subcuenca del Aguay se produjeron gran cantidad de procesos de remoción en masa, del tipo avalanchas de detritos, deslizamientos de suelo y flujos de barro y detritos (Figura 23).

La planta potabilizadora de agua del Aguay aún hoy en día se encuentra sobre una terraza cuaternaria circundada por un meandro del río Tartagal. La creciente del evento 2009, cubrió gran parte de la mencionada terraza y produjo el relleno con sedimentos de la casa de la planta que contenía las bombas. Además se depositaron numerosos troncos entre la terraza y el lecho del río en dirección opuesta a la del río, esto sugirió que luego de haberse producido el endicamiento y aumento del nivel de agua, se produjo un rápido descenso del material acumulado por el río Tartagal o bien al abrirse el dique natural generado por los troncos (Figura 24). Otros daños provocados por la crecida fueron la rotura de la toma de agua y el tendido eléctrico que cruzaba el río.

Cabe mencionar que la Quebrada del Aguay pertenece al Terciario Subandino, con inclinación de 65° al oeste y areniscas fuertemente deleznables. Estas características favorecen los procesos de movimientos en masa. El contacto entre las rocas terciarias y relictos de terrazas cuaternarias se encuentra aproximadamente 7 m por encima del fondo del valle, poniendo en evidencia una importante profundización del cauce generada por erosión en éste último evento.

En la cuenca media del río Tartagal, se evidenciaron acumulaciones de troncos y ramas en sectores de gran sinuosidad sobre la terraza baja, lo que sugiere que el nivel de agua durante la crecida, la afectó (Figura 25-A). En la parte cóncava de los meandros, la erosión lateral fue severa ya que rompió y destapó los caños de agua de la planta potabilizadora de agua, ubicada en la cuenca media (Figura 25-B).



Figura 22. Superficies afectadas por el alud en la zona urbana de la ciudad de Tartagal sobre imagen satelital de Google Earth. El polígono rojo indica la zona más perturbada; el área en amarillo indica cuán lejos llegó el agua y el material sedimentado (Baumann *et al.*, 2009).

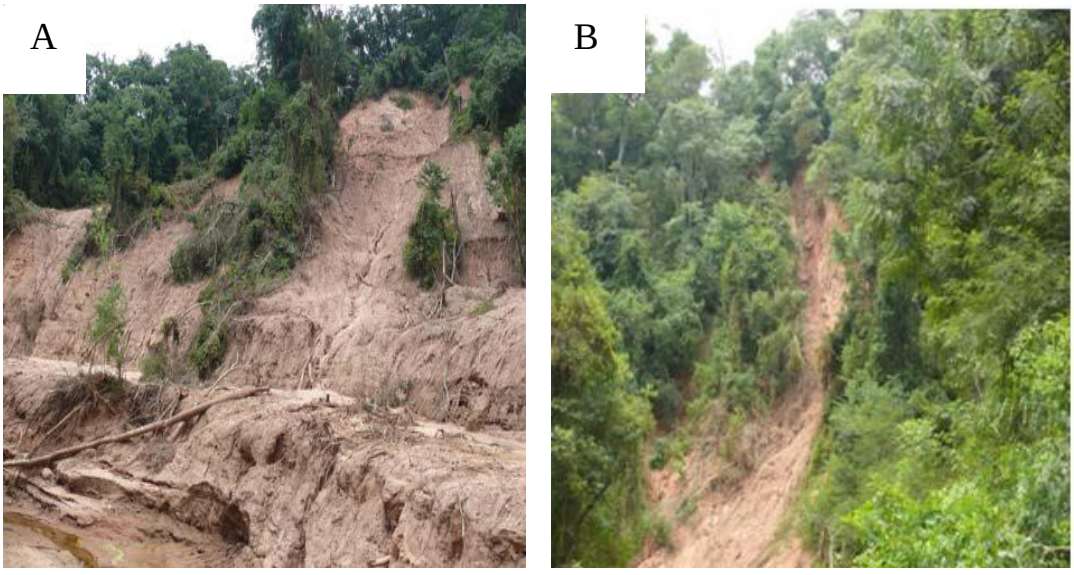


Figura 23. Quebrada del Aguay en la cuenca alta del río Tartagal. A) Se observa erosión en el cauce principal, movimientos de masa en las laderas y depósitos de troncos, ramas y sedimentos que dejaron los flujos a su paso; B) Avalancha de detritos (Baumann *et al.*, 2009).



Figura 24. Vista aérea de la planta potabilizadora de agua del Aguay. Se observan los depósitos de troncos y sedimentos sobre la terraza circundada por el río Tartagal (Baumann *et al.*, 2009).

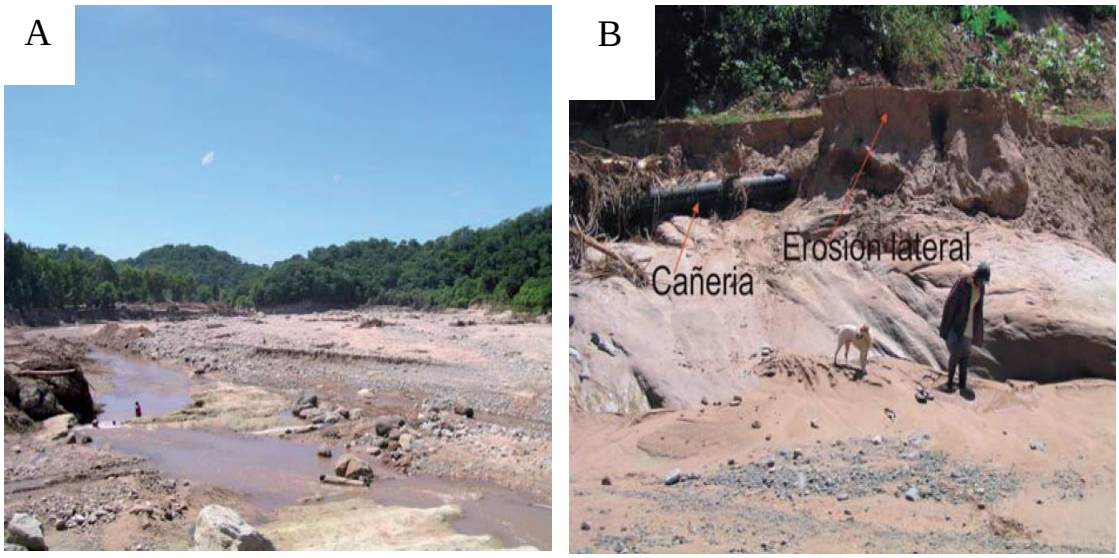


Figura 25. Vista del río Tartagal en la cuenca media. A) En el margen derecho se observan depósitos de la última crecida sobre la terraza del río; B) Erosión lateral en la terraza del río provocada por el paso de la creciente del evento 2009. (Baumann *et al*., 2009).

2.3.1. La intervención humana y los cambios producidos en la Cuenca

La cuenca ha sido modificada por actividades antrópicas desde la fundación de la ciudad en el año 1924. La ciudad de Tartagal, como ya se ha mencionado, está asentada sobre el abanico del río homónimo. El río Tartagal atraviesa el abanico y deja sus sedimentos a más de 20 kilómetros aguas abajo de la ciudad. Entre los años 1975 y 1989, su carácter meandriforme fue modificado mediante la rectificación y canalización (en parte recubierto por hormigón), lo que produjo una mayor profundización por erosión vertical y cambios en su perfil longitudinal, que se observa en el cambio de pendiente que tiene el río cuando arriba a la ciudad. Asimismo, se prolongó su cauce 13 km (guiado por un canal abierto entre dos campos de cultivos). Como consecuencia de ello, se generó un salto topográfico que modificó el nivel de base provocando la profundización y el ensanchamiento del cauce mediante erosión retrocederte (Baumann *et al.*, 2009).

Otras intervenciones en la zona se relacionan con la actividad petrolera (apertura de picadas, caminos y líneas sísmicas); explotación forestal; actividad agropecuaria; pastoreo; oleoductos y obras civiles para infraestructura de la ciudad (tendido eléctrico, caminos, puentes, planta potabilizadora, canalizaciones, etc.).

Los recursos forestales del NOA tienen una larga historia de uso que se caracteriza por la falta de planificación en la extracción. En la zona de Tartagal, la explotación forestal no fue planificada para mantener el recurso, sino que se planteó desde un punto de vista totalmente extractivista y selectivo, generalmente sin las mínimas consideraciones de manejo forestal sostenible (Minetti, 2005). La forma de aprovechamiento consistió primeramente en la extracción de especies de madera valiosas como cedro, roble, quina y mora. A medida que éstas se agotaban o resultaba antieconómica su explotación por su inaccesibilidad geográfica, se intensificó la extracción de otras especies de menor valor comercial. El avance tecnológico desde fines de los años ‘60 (motosierras, topadoras, etc.), permitió el aprovechamiento de áreas que antes eran consideradas “no accesibles”. La apertura de picadas de exploración petrolera -que en general fueron construidas sin observar la toponimia- constituyeron vías extras para la extracción de madera que posteriormente derivaron en cárcavas (Brouver *et al.*, 2006).

La función del bosque como protector de cuencas, se altera si éstos están degradados. Se entiende por "bosque degradado", a aquel cuya cobertura boscosa inicial se ha visto afectada por la explotación insostenible de madera y/o productos forestales no maderables de modo tal que se ha alterado su estructura, composición, procesos, funciones y dinámica más allá de la resistencia a corto plazo del ecosistema, afectando la capacidad del bosque para recuperarse plenamente de la explotación en el corto o mediano plazo (OIMT, 2002). En este sentido, estudios ponen de manifiesto que ocurrieron cambios importantes en la estructura y composición del bosque que permiten afirmar que el proceso de degradación se ha intensificado entre 1975 y 2000 en la cuenca del rio Tartagal y que de continuar con este sistema de manejo, su uso no podrá sostenerse en el tiempo (Brouver *et al.*, 2006).

La vegetación contribuye sustancialmente a bajar el nivel de amenaza y el riesgo de ocurrencia de movimientos en masa. La tala selectiva y la deforestación no planificada favorecen la erosión y la escorrentía. Cuanto más pronunciadas, impermeables y desprovistas de vegetación son las laderas y más copiosas las precipitaciones, mayor es la probabilidad de alteraciones perjudiciales en el ciclo hidrológico de las cuencas (Minetti, 2005).

La Ley N° 26.331 de Presupuestos Mínimos de Protección de los Bosques Nativos, conocida como "La Ley de Bosques", fue aprobada por el Congreso de la Nación Argentina en el año 2007. Sin embrago fue reglamentada recién en 2009, luego de la ocurrencia del alud que afectó a Tartagal. Dicha ley distingue tres áreas en los mapas de usos del bosque: ***(1)*** Área verde: donde se permite desmontar (previo informe ambiental y audiencia pública); ***(2)*** Área amarilla: donde se permite tala controlada y ganadería de bajo impacto, y ***(3)*** Área roja: donde no se permite ningún desmonte ni actividad. Es de destacar la ocurrencia de tres hechos importantes desde que se promulgó la Ley, a saber: ***(1)*** que el promedio de deforestación bajó un 20 %, ***(2)*** que veinte provincias establecieron por ley, el Ordenamiento Territorial de Bosques Nativos y, ***(3)*** que no se ha cumplido con lo que prevé la ley en cuanto al *Fondo Nacional para el Enriquecimiento y Conservación de los Bosques Nativos*, que consiste en la asignación del 0.3 % del Presupuesto Nacional, más el 2 % del total de las retenciones a exportaciones de productos procedentes de la agricultura, la ganadería y el sector forestal. En función de esto, en 2013 los fondos deberían llegar a 2,300 millones de pesos pero, de acuerdo con el Presupuesto aprobado en el Congreso

Nacional, serán sólo de 230 millones lo que se asignará, es decir diez veces menos (http://www.pagina12.com.ar/diario/sociedad/3-213079-2013-02-02.html). Según organizaciones ambientalistas como Greenpeace y Fundación Vida Silvestre, las provincias de Santiago del Estero, Salta, Chaco y Córdoba autorizaron desmontes violatorios de la Ley 26.331, permitiendo que en una parcela de pocas dimensiones, sólo algunos árboles maduros (25/ha aproximadamente), queden en medio de pasturas altas destinadas el ganado. Es importante destacar que el problema del sobrepastoreo se ha intensificado en los últimos años en el bioma de las yungas, debido a una mayor penetración de la actividad ganadera en la zona serrana al ser desplazada de la zona pedemontana por la agricultura (Brouver *et al.,* 2006). Esta y otras actividades como el desmonte, implican la pérdida de gran parte de los servicios ambientales que suministra el bosque, como la regulación climática y la conservación de los suelos. En éste sentido, la evaluación de la cobertura vegetal y estimación de pérdida de suelo en el período 1989-2006 en la cuenca de Tartagal, reveló que los cambios en el uso del suelo por desmontes condujeron a que el 70% del área comprendida por la cuenca baja y zonas de influencia del rio Tartagal estuviera representada por clases erosivas alta a muy alta según la clasificación de la FAO.

Capítulo III

Materiales y Métodos

A partir de datos de entrada y auxiliares, se generaron productos intermedios (mapas temáticos de factores condicionantes de movimientos de laderas), que sirvieron de base para la generación de un mapa de zonación de susceptibilidad por procesos de remoción en masa, como producto final (Figura 26). En todos los datos espaciales se utilizó el mismo sistema de coordenadas: UTM Zona 20 Sur, Datum WGS-84. Todas las operaciones fueron realizadas utilizando paquetes de softwares comerciales.

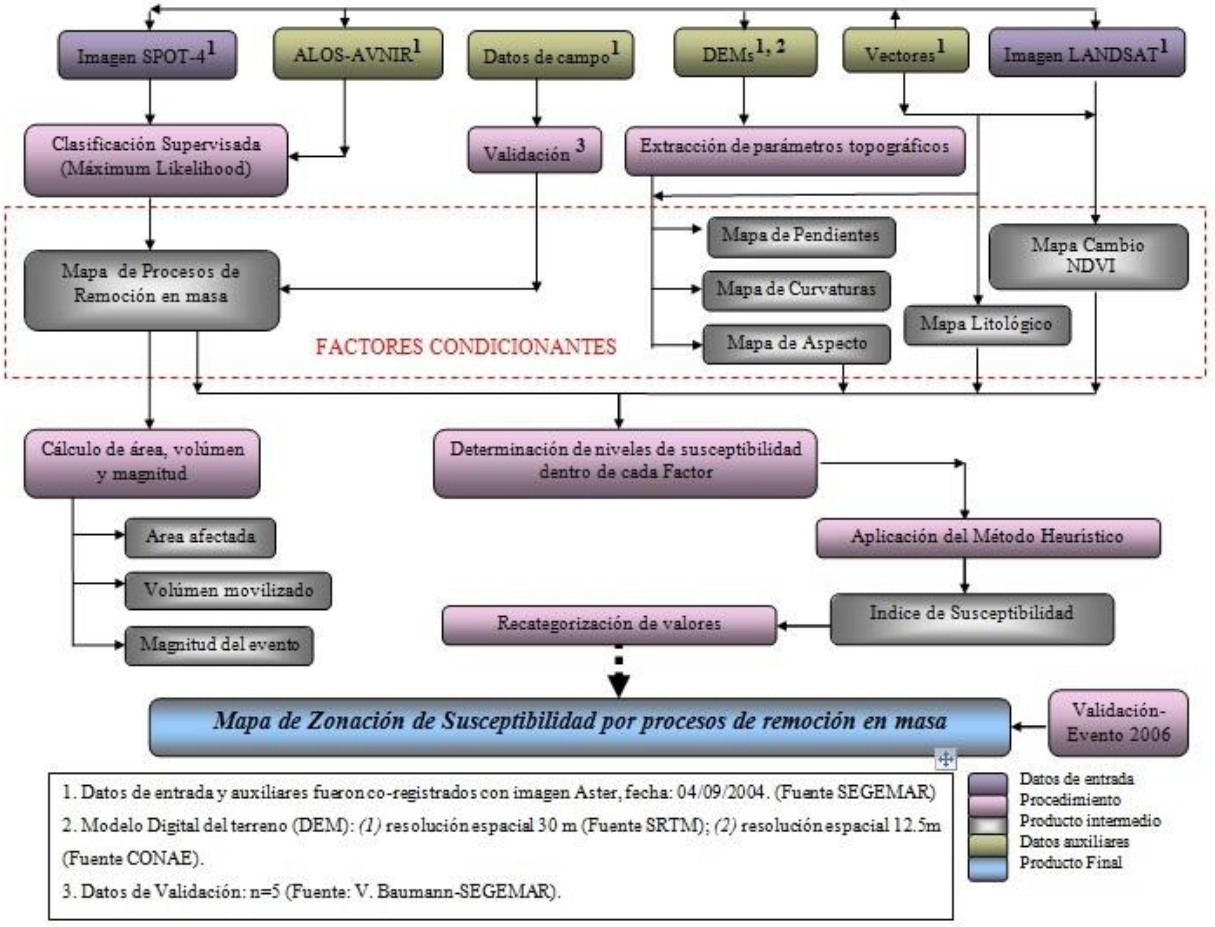


Figura 26. Representación esquemática que muestra los datos usados y procedimientos de trabajo realizados para la obtención del mapa de zonación de susceptibilidad por procesos de remoción en masa en la cuenca del río Tartagal. Ver texto para mayor detalle de cada paso.

Materiales

3. 1. Imágenes Satelitales

3. 1. 1. ASTER

El sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), es el resultado de un esfuerzo de cooperación entre la Administración Espacial y Aeronáutica Nacional de EEUU (NASA, por sus siglas en inglés); el Ministerio de Economía de Japón; Comercio e Industria (METI) y de los Sistemas Espaciales de Japón (J-Space system, por sus siglas en inglés). El sistema se encuentra a bordo del satélite Terra y las imágenes son captadas desde 1999. Está compuesto por 3 subsistemas, cada uno de cuales presenta características particulares tales como: ***(1)*** tres bandas en la región espectral del visible e infrarrojo cercano (VNIR, del inglés "Visible and Near Infrared") (0.52 a 0.86 μm), con una resolución espacial de 15 metros; ***(2)*** seis bandas en la región espectral del infrarrojo de onda corta (SWIR, del inglés "Short Wave Infrared") (1.6 a 2.4 μm), con una resolución espacial de 30 metros y, ***(3)*** cinco bandas en el infrarrojo térmico (TIR, del inglés "Thermal Infrared") (8.1 a 11.6 μm), con una resolución espacial de 90 metros.

Se utilizó una imagen ASTER ortorrectificada, adquirida el 04 de Septiembre de 2004. La misma fue provista por el Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR). Dada la calidad geométrica de estos datos, fueron utilizados como base para el SIG que se construyó para éste proyecto. La imagen fue calibrada radiométricamente y posteriormente se obtuvo la reflectancia en superficie.

3. 1. 2. SPOT- 4

El satélite SPOT-4 (*Satellite pour l'Observation de la Terre*), operado por la Agencia Espacial francesa (CNES), fue lanzado el 24 de Marzo de 1998 y dejó de funcionar en enero de 2013. Posee una banda pancromática o monoespectral (0.50 a 0.73 μm), con una resolución espacial de 10 m y 4 bandas multiespectrales de 20 m de resolución espacial centradas en el verde (0.50 a 0.59 μm), el rojo (0.61 a 0.68 μm), el infrarrojo cercano (0.78 a 0.89 μm) y el infrarrojo de onda corta (1.58 a 1.75 μm).

Para la identificación y mapeo de los procesos de remoción en masa se utilizó una imagen del 15 de febrero de 2009, de 10 m de resolución espacial, resultado de la fusión de una imagen

pancromática (10 m) y una multiespectral (20 m). La misma cubrió el 100 % del área de estudio, totalmente libre de nubes y niebla. La adquisición tuvo lugar en el contexto de la activación de la *Carta Internacional "El Espacio y Las Grandes Catástrofes"*, por el alud que afectó la Ciudad de Tartagal, el 9 de febrero de 2009, resultado de las inundaciones y movimientos en masa ocurridos en las cuencas alta y media del río Tartagal. Los datos fueron provistos por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) (@ CNES 2012, Distribution SPOT Image S. A., Francia, todos los derechos reservados)).

Los datos fueron calibrados radiométricamente y posteriormente se obtuvieron las reflectancias en superficie. Además fueron co-registrados con la imagen ASTER.

3.1.3. ALOS

ALOS es una misión lanzada el 24 de Enero de 2006 por la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA, por sus siglas en japonés). Está equipado con tres sensores de observación terrestre: ***(1)*** el Instrumento de Sensor Remoto Pancromático para Mapeo Stereo (PRISM), que sirve para medir la precisión de la elevación de la tierra; ***(2)*** el Radiómetro Avanzado del Visible e Infrarrojo Cercano-tipo 2 (AVNIR-2), diseñado para estudiar la cobertura terrestre, y ***(3)*** un de Radar de Apertura Sintética en banda L, de arreglo de fases (PALSAR) que permite obtener información de la tierra de día y noche y en todos los climas. ALOS PRISM posee una banda pancromática que opera en la región del visible e infrarrojo cercano (0.52 a 0.77 µm), con una resolución espacial de 2.5 m (en la vista con dirección Nadir). El radiómetro ALOS AVNIR-2, consiste en 4 bandas en la región del visible e infrarrojo cercano (0.42 a 0.89 µm) y provee una resolución espacial de 10 m.

Los datos ALOS PRISM nivel 1B1 de fecha 27/04/2008, se usaron para la generación del DEM; la imagen presentó un 10 % de cobertura nubosa. Mientras que los de ALOS AVNIR- 2, nivel 1B2 de fecha 26/07/2007, sirvieron para asistir en la identificación de los procesos de remoción en masa. Ambos tipos de imágenes ALOS fueron provistas por CONAE.

3.1.4. LANDSAT

El programa LANDSAT consiste en una serie de misiones satelitales de observación terrestre lanzado en 1972 conjuntamente por la NASA (National Space and Space Administration) y el Servicio Geológico de E.E.U.U. (U.S. Geological Survey). Landsat 5-TM fue lanzado en 1984 con un sensor TM (del inglés, *Thematic Mapper*). Presenta tres bandas en la región del visible (0.45 a 0.69 µm), una en la región del infrarrojo cercano (0.76 a 0.90 µm) y una en la región del infrarrojo medio (1.55 a 1.75 µm), todas con 30 m de resolución espacial; y una banda en el infrarrojo térmico (10.40 a 12.50 µm), con 120 m de resolución. Landsat 7 ETM+ fue lanzado en abril de 1999, con un nuevo sensor denominado ETM+ (del inglés, *Enhanced Thematic Mapper Plus*) por la NASA. Está compuesto por 8 bandas espectrales, 6 de ellas con las mismas características y funciones de Landsat 5-TM. Entre las principales mejoras técnicas respecto de su antecesor Landsat 5-TM (que lo hacen más versátil y eficiente para el estudio de cambio global, monitoreo de cobertura de la tierra y mapeo de grandes áreas) se destacan, la adición de una banda pancromática (0.52 a 0.90 µm) con una resolución de 15 m. También presenta mejoras en las características geométricas y radiométricas y una mayor resolución en el canal térmico (60 m de resolución espacial). En mayo del año 2003 dejó de funcionar –debido a una falla en el componente del hardware- dando como resultado que todas las escenas adquiridas desde el 14 de Julio de ese año hayan sido colectadas en modo "SLC-off" (es decir, con un bandeado en las mismas).

Se usó una serie temporal (período 1999-2011) de imágenes LANDSAT 5-TM y LANDSAT 7 ETM, escena 230/076 correspondiente a la estación de primavera. Las mismas fueron calibradas radiométricamente y posteriormente se obtuvieron valores de reflectancia (más detalles en Sección 3.6.6).

3. 2. Modelo Digital de Elevaciones (DEM)

Un modelo digital de elevaciones (DEM, por sus siglas en inglés) se define como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno (Ono, 2009). Son la base para todo Sistema de información geográfica y resultan imprescindibles en estudios geomorfológicos, hidrológicos, geológicos, de vulnerabilidad, entre otros (Soriano Franquet, 2009).

Se tuvo acceso a dos DEMs: ***(1)*** DEM de 30 m de resolución, facilitado por el convenio entre la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) y el Instituto Geográfico Nacional (IGN), generado a partir de la misión "Shuttle Radar Topography Mission" (SRTM) y; ***(2)*** DEM de 12.5 m de resolución espacial, generado a partir de datos ALOS-PRISM, desarrollado por G. Toyos (CONICET-CONAE) y J. Otero (CONAE), en el marco de este proyecto y también con el propósito de contribuir al desarrollo de un protocolo de generación de DEMs a partir de imágenes satelitales en CONAE.

3.2.1. DEM SRTM

La Misión Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) es un proyecto internacional desarrollado por la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial (NGA) y la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio Estadounidense (NASA). Consistió en un sistema radar especialmente modificado que voló a bordo del transbordador espacial Endeavour y obtuvo un conjunto de datos globales de elevaciones para generar la base de datos de modelos digitales de terreno del 80 % del globo terrestre. En su primera edición (febrero de 2000), se lograron DEMs con resolución global de 3" (90 m). Posteriormente, una nueva actualización ofreció una precisión de 1" (30 m) para la mayor parte de la superficie terrestre (Rodríguez *et a*l., 2006). Estos datos sirvieron para la caracterización general de la topografía del área de estudio.

3.2.2. DEM ALOS

El DEM generado a partir de los datos ALOS PRISM se realizó utilizando técnicas de fotogrametría digital. El mismo fue posible a partir de la recolección de un set de puntos de control en el terreno (GCP, del inglés Ground Control Points) registrados entre el 26 y 28 de

abril de 2012 por P. Cardozo (CONAE) y C. Peralta (Universidad Nacional de Salta), mediante el uso de técnicas de GPS Diferencial, en la cuenca del río Tartagal y zonas de influencia (Ver *Apéndice*).

3.3. Carta Litológica

La litología es uno de los parámetros más importantes a considerar en el análisis de la distribución espacial de la ocurrencia de los movimientos en masa (Moreiras, 2005).

Se circunscribió el mapa litológico al área de estudio, a partir de la Hoja de Peligrosidad Geológica 2363-I de Tartagal (escala 1: 250.000) (Baumann *et al.*, inédito) del Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR). En el mismo, es posible reconocer 6 de los 7 tipos de litologías características de la zona: ***(1)*** Areniscas limosas y pelitas subordinadas (Terciario Subandino); ***(2)*** Areniscas deleznables (Grupo Cuevo, Tacurú, Fn. Tranquitas); ***(3)*** Pelitas y areniscas subordinadas (Fn. San Telmo); ***(4)*** Areniscas competentes (Fn. Las Peñas); ***(5)*** Conglomerados y areniscas conglomerádicas (Fn. Piquete) y, ***(6)*** Depósitos de abanicos aluviales cuaternarios

3.4. Otros Datos Auxiliares

Se usaron diferentes vectores, tales como: un vector marco para definir la misma zona de trabajo en los todas las imagenes y productos usados; un vector de toda la cuenca y de sus partes alta, media y baja y otros vectores correspondientes a ríos, caminos, zonas urbanas, etc. para la caracterización de la zona de interés.

El vector cuenca, fue delimitado en función del área que comprende a todos los cursos de agua que drenan hacia el río principal (río Tartagal), y por éste hacia un punto de salida común. Una vez que se tuvo el DEM -generado a partir de datos ALOS-, el vector fue redefinido para excluir las nubes que cubrían la parte oeste de la primera cuenca especificada.

Métodos

3.5. Identificación y mapeo de procesos de remoción en masa

La imagen SPOT-4 se corregistró con la imagen ASTER debido a la distorsión que presentaban los datos. Para ello, se tomaron 20 GCP distribuídos uniformemente, con un error cuadrático medio de 0.98 y el método de remuestreo utilizado fue el vecino más cercano, calculado como un polinomio de grado 2 (el que mejor ajusta en zonas montañosas). Previamente, los datos fueron calibrados radiométricamente y se obtuvieron las reflectancias mediante el módulo FLAASH de ENVI 4.7. La clasificación automática final, también se corregistró usando los GCP previamente localizados.

La identificación preliminar de los procesos de remoción en masa se basó en la interpretación de distintas composiciones de color (falso color) de la imagen SPOT-4; con asistencia de la imagen ALOS-AVNIR. De acuerdo con Chuvieco (1996), una de las principales ventajas del análisis visual sobre el digital, es su capacidad para incorporar criterios complejos -tales como tono, color, textura, estructura, entre otros- a la interpretación de la imagen. Cabe mencionar, que en las diferentes composiciones color, se usó la banda del infrarrojo cercano, la cual permite distinguir claramente entre zonas cubiertas y descubiertas de vegetación, un factor que puede mostrar la presencia de los movimientos de ladera. Así, las composiciones usadas fueron: RGB: (4-3-1); (3-2-1) y (1-2-3).

Esto permitió la definición de regiones de interés (ROIs, del inglés "Regions of Interest") de áreas de bosque y movimientos de laderas. Se evaluó la separabilidad espectral de las mismas, por medio de los Índices de Jeffries-Matusita y de Divergencia Transformada. Las mencionadas ROIs, fueron utilizadas luego como sitios de entrenamiento para una clasificación supervisada con el algoritmo de máxima verosimilitud. De esta manera, el proceso de identificación y mapeo, que tradicionalmente se basa en la interpretación visual, se vio facilitado por la automatización brindada por éste algoritmo de clasificación disponible en todos los paquetes de softwares comerciales para el procesamiento de imágenes satelitales (en este caso ENVI 4.7). Durante el proceso de clasificación, se introdujo un factor de escala de datos de 10,000 para convertir datos de reflectancia en números enteros, esto es porque los datos SPOT se encontraban escalados en el rango de 0 a 10,000.

Dado que es común que los procesos de remoción en masa presenten similitud espectral con lagunas, caminos, zonas urbanas, ríos y lechos del río (Barlow *et al.*, 2006; Borghuis *et al.*, 2007; Martha *et al*., 2010), se aplicó una máscara a la imagen SPOT-4 –previo al corregistro y clasificación- para cubrir estas zonas que podrían interferir en los análisis y posteriores resultados (Figura 27). Dicha máscara se elaboró a partir de la unión de los ROIs individuales de cada una de los objetos similares espectralmente, previamente definidos. Una máscara de la cuenca baja también fue delineada de manera de excluir esa zona de los análisis, ya que ésta parte el bosque ha sido totalmente modificada y de acuerdo a las pendientes y el conocimiento de campo (Baumann, V., com. pers.), los movimientos de laderas que se encuentran circunscriptos a las barrancas de los arroyos, están vinculados con erosión fluvial. Se utilizaron solo los límites de la cuenca para el cálculo del área y volúmen afectado por tales movimientos, así como en análisis posteriores.

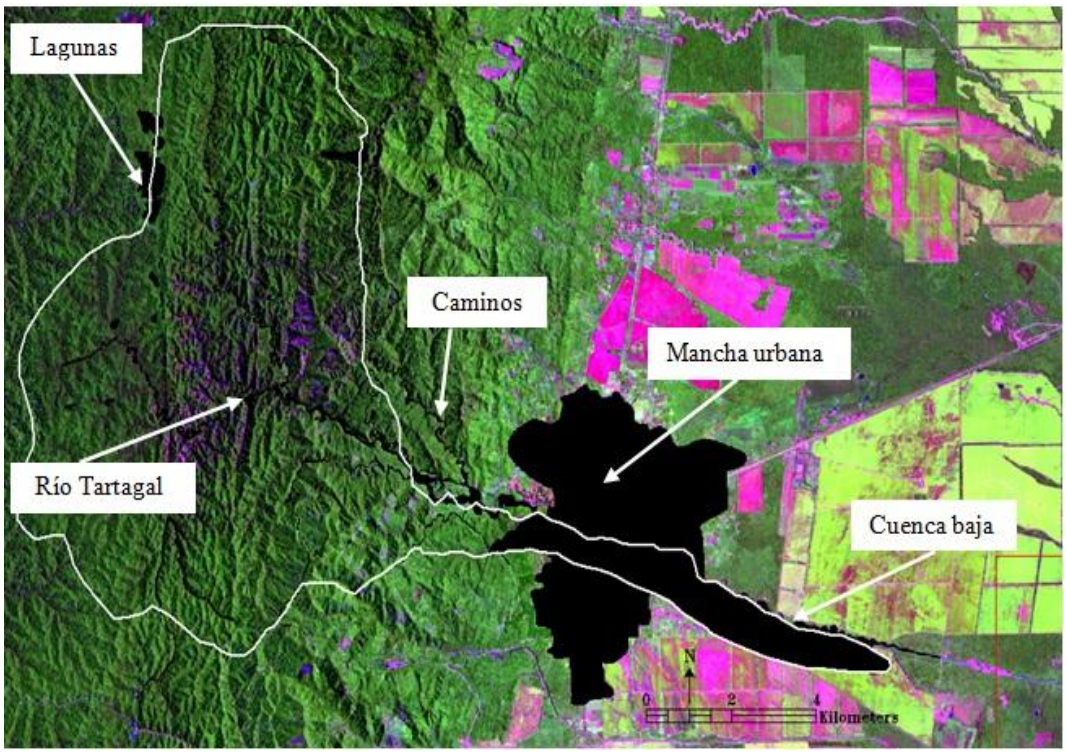


Figura 27. Máscaras utilizadas para cubrir las zonas espectralmente similares a los procesos de remoción en masa en la cuenca del río Tartagal, vista sobre una composición RGB: 431 de la imagen SPOT- 4, de fecha 15/02/2009. Se muestra la imagen previa al corregistro, en la cual se pone de manifiesto el desfasaje entre ésta y el vector cuenca, dado que las máscaras fueron aplicadas antes del corregistro.

Se probaron varios umbrales de probabilidad del algoritmo usado para ambas clases (bosque y movimientos de laderas), con el objeto de evaluar las clasificaciones resultantes mediante los criterios comúnmente adoptados por los geomorfólogos en fotografías aéreas, tales como: análisis visual e interpretación heurística del tamaño, color, tono, textura y patrón individual y colectivo mostrados (Ray, 1960; Miller, 1961; Rib and Liang, 1978; van Zuidam, 1985; Fiorucci *et al*. 2011), y de ésta manera decidir cuál clasificación fue la más representativa de los movimientos de laderas del evento del año 2009. Posteriormente, se realizaron procesamientos post-clasificación, para eliminar los píxeles aislados identificados erróneamente como movimientos en masa mediante la herramienta "Clase Interactiva" de ENVI 4.7.

Se evaluó la precisión de la clasificación obtenida, con cinco registros de movimientos de laderas distribuídos en dos zonas de la cuenca bajo estudio. Los mismos fueron tomados días posteriores al evento del año 2009 mediante GPS Garmin por una comisión enviada por el Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR) (Tabla 3, Figura 28). Dos de los puntos se localizaron en la Quebrada El Aguay, en la cual se encuentra un camino que lleva a la planta potabilizadora de agua. Esta última fue parcialmente destruida durante el mencionado evento. Los demás puntos están ubicados en las cercanías del camino que lleva a Yariguarenda, zona más alta de la cuenca ubicada en el noreste de la misma.

Tabla 3. Coordenadas geográficas y breve descripción de los movimientos de laderas registrados mediante GPS Garmin, en el sur (Quebrada El Aguay) y noreste (Yariguarenda) de la cuenca del río Tartagal, Salta. (Fuente: V. Baumann-SEGEMAR).

Zona	Punto	Coordenada	Descripción
Quebrada del Aguay	155	63°53'37.83" W 22°30'41.47" S	Deslizamiento de suelos ocurrido en la barranca de la Quebrada.
	154	63°53'42.73" W 22°30'49.69" S	Flujo que provino de una quebrada perpendicular a la Quebrada del Aguay y deslizamiento que se asentaron en el camino que va a la planta potabilizadora el Aguay.
Yarigua-renda	1	63°51'21.32" W 22°29'33.28" S	Deslizamiento de suelos que se produjo en una pequeña quebrada perpendicular al camino que lleva a Yariguarenda.
	2	63°51'25.84" W 22°29'30.78" S	Deslizamiento de suelos que se produjo en ambos laterales de una pequeña quebrada, los materiales removilizados se encauzaron hacia un arroyo (Figura 4.1.2).
	4	63°51'26.78" W 22°29'19.74" S	Deslizamientos de suelos que se produjo en una pequeña quebrada perpendicular al arroyo.

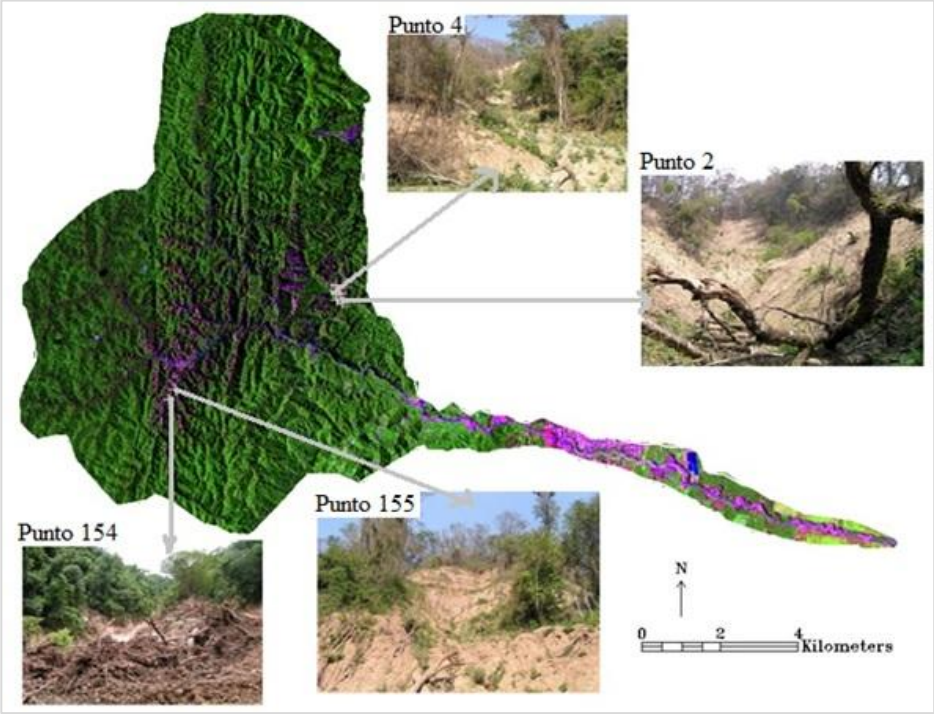


Figura 28. Puntos utilizados para la validación de la clasificación supervisada en dos zonas de la cuenca del río Tartagal (Salta, Argentina), registrados luego del evento del año 2009. (Fotos: V. Baumann).

Con el objeto de compensar la falta de suficientes datos de verdad de campo y para una mejor comprensión del evento, se llevaron a cabo clasificaciones variando el umbral de clasificación de 0.97 (el que mejor describía los movimientos de laderas del evento), en un ±10 %. Así se estableció un rango de áreas en el que podría haber estado comprendida la superficie afectada por tales movimientos en masa y también se estableció un rango de volúmenes del material probablemente removido.

El volúmen promedio del material removido durante el mencionado evento se estimó a partir del área total ocupada por los movimientos en masa (obtenido como N° píxeles clasificados x área del píxel de la imagen SPOT-4), y el espesor empírico mínimo y máximo de 0.5 y 1 m respectivamente, mediante la fórmula:

$$\textbf{Volúmen} = A_T \times Ee \qquad (4)$$

donde:

A_T: es el área total ocupada por los movimientos en masa

Ee: es el espesor empírico del material movilizado

Estos valores promedios de espesores se basan en observaciones de campo realizadas por el SEGEMAR, inmediatamente después del evento. El volúmen calculado del material removido se usó como una aproximación de la magnitud del evento (una cuantificación de la energía probablemente disipada por las fallas de las pendientes y del posible daño) (Guzzetti *et al*., 2009), definido como:

$$\textbf{Magnitud} = \text{Log}_{10} V_T \qquad (5)$$

donde:

V_T: es el volúmen total removido durante un evento.

3.6. Análisis de factores condicionantes

La ocurrencia de los movimientos de laderas está relacionada a muchos factores, incluyendo el clima, hidrología, litología, estructura e historia geomorfológica, sin embargo no siempre es posible incluir todos los aspectos en un análisis de susceptibilidad (Moreiras, 2005). Varios autores han usado la existencia de movimientos en masa previos, grado de la pendiente y naturaleza del lecho de rocas, para definir unidades de terreno (Brabb *et al*., 1972; Lucini, 1973; Drennon and Schleining, 1975;). Otros han incorporado nuevas variables, tales como: proximidad al drenaje y a estructuras, red de caminos, cobertura de la tierra, NDVI, actividad tectónica, precipitaciones, entre otras (Gupta &Joshi, 1990; Anbalagan, 1992; Guzzetti *et al.*, 1999; Castellanos y Van Westen, 2001; Dai and Ngai, 2002; Donati and Turrini, 2002; Lan *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2004; Moreiras, 2005; Saha *et al.*, 2005; Guzzetti *et al*., 2006; Lee and Evangelista, 2008; Bathrellos *et al*., 2009; Rossi *et al*., 2010).

El análisis de susceptibilidad que aquí se presenta tuvo en cuenta factores tales como: litología, ángulo de la pendiente, curvatura, e inventario de los movimientos en masa del evento del año 2009. Cabe aclarar, que la no inclusión de otros factores no implica de ninguna manera que tengan menor importancia en el contexto de la susceptibilidad del terreno. Tal como se mencionó en la sección 1.4, la elección de los mismos estuvo en función de: ***(1)*** la consulta de la bibliografía actualizada sobre la temática que aquí se trata y, ***(2)*** la disponibilidad de los datos. Asimismo, es de destacar que algunos de los factores condicionantes que se analizaron no aportaron información suficiente como para incorporarlos al modelo de susceptibilidad. Esto se discute ampliamente en el **Capítulo V** de este trabajo de tesis.

3.6.1. Pendiente

La pendiente en un punto del terreno se define como el ángulo existente entre el vector normal a la superficie en ese punto y la vertical. La relación entre la ocurrencia de movimientos de laderas y la pendiente es innegable. Mientras el ángulo de la pendiente aumenta también incrementa la tensión en el suelo ó del material no consolidado. La mayoría de las evaluaciones de peligrosidad regional por movimientos en masa, utiliza el ángulo de pendiente como una de las variables independientes más importantes (Brabb *et al*., 1972; Campbell and Bernknopf,

1993; Corominas *et al*., 2003; Guzzetti *et al*., 2006; Moreiras, 2005, 2009; Bathrellos *et al*., 2009; Marta *et al*., 2010).

Se generó el mapa de pendientes de la zona de estudio a partir del DEM de ALOS PRISM. Asimismo, se analizaron las estadísticas de posición (percentiles) y de tendencia central de los datos. Posteriormente, se reclasificó el mapa en cuatro categorías en función de las geoformas que representan: ***(1)*** Pendientes muy bajas (0°-7°), que corresponden a terrazas y a llanuras aluviales; ***(2)*** Pendientes bajas (7°-15°), se atribuyen a ríos secundarios, valles transversales al valle principal y laterales de valles; ***(3)*** Pendientes moderadas (15°-30°), incumben a los laterales de los valles, tanto de los valles de rumbo (los que siguen la estructura de las sierras) como los valles que cortan las sierras (valles de inclinación) y, ***(4)*** Pendientes altas (>30°) que corresponden a las escarpas de erosión, este rango de pendientes es más común en la parte media de la cuenca en donde es posible encontrar las rocas más antiguas. La reclasificación de pendientes usada, resultó en base al criterio y experiencia en campo en la zona de estudio de V. Baumann (SEGEMAR), la cual presenta algunas diferencias con las planteadas por otros autores para otras zonas del planeta (Moreiras, 2004; Bathrellos *et al*., 2009). En las zonas de Yariguarenda y El Aguay, se analizaron como se distribuyeron los rangos de pendientes entre los píxeles que resultaron positivos para los movimientos de laderas. Para ello, se tomó en cada una de las zonas, una región arbitraria de 0.07 km^2 que incluía los puntos de validación.

Cada rango de pendientes fue ranqueado, de acuerdo a la proporción existente entre el área ocupada por los movimientos en masa (identificada por la clasificación supervisada) en ese rango y el área ocupada por cada rango de pendientes. En base a esto, se asignó un valor discreto de susceptibilidad, el cual luego fue considerado en la evaluación de susceptibilidad final.

3.6.2. Curvatura

La curvatura es la tasa de cambio en la pendiente, depende de las derivadas de segundo grado de la altitud, es decir, de los cambios de pendiente en el entorno del punto. A efectos prácticos puede calcularse como la pendiente de la pendiente. La curvatura tiene especial interés como

variable influyente en fenómenos como la escorrentía superficial, canalización de aludes, erosión y flujos en general (Felicisimo, 1994).

Una curvatura positiva indica que la superficie es cóncava hacia arriba en todo el píxel, mientras que una curvatura negativa indica que es cóncava hacia abajo. Un valor de cero indica que la superficie es plana (Lee and Evangelista, 2008). Mientras más negativo el valor de curvatura, la probabilidad de ocurrencia de movimientos de laderas aumenta (Vasantha Kumar *et al*., 2007; Lee and Evangelista, 2008).

Se generó el mapa curvatura de la zona de estudio a partir del DEM de ALOS PRISM. Posteriormente fue reclasificado en tres categorías: ***(1)*** curvatura negativa, que incluye los valores negativos; ***(2)*** curvatura positiva, que incluye los valores positivos y; ***(3)*** superficie plana, que incluye los valores cero de curvatura.

Al igual que en la litología, cada rango de curvaturas fue ranqueado, de acuerdo a la proporción existente entre el área ocupada por los movimientos en masa en ese rango y el área ocupada por cada rango de curvaturas. En base a esto, se asignó un valor discreto de susceptibilidad, el cual luego fue considerado en la evaluación de susceptibilidad final.

3.6.3. Orientación de la Pendiente (Aspecto)

La orientación es una variable de distribución circular y puede definirse como el ángulo existente entre el vector que señala el Norte y la proyección sobre el plano horizontal del vector normal a la superficie en un punto. De esta manera, el mapa de aspecto muestra la orientación de los distintos planos inclinados, caras y vertientes (Felicisimo, 1994). Se generó el mapa orientación de pendientes de la zona de estudio a partir del DEM de ALOS PRISM, con ocho clases: ***(1)*** N-NE; ***(2)*** NE-E; ***(3)*** E-SE; ***(4)*** SE-S; ***(5)*** S-SO; ***(6)*** SO-O; ***(7)*** O-NO y ***(8)*** NO-N.

3.6.4. Litología

Las propiedades físicas y la resistencia de cada material de un determinado tipo litológico, determinan su comportamiento tenso-deformacional y, por lo tanto, su estabilidad (Moreiras, 2009). Al igual que los otros factores condicionantes, cada tipo litológico fue ranqueado, de

acuerdo a la proporción existente entre el área ocupada por los movimientos en masa por litología y el área ocupada por cada tipo litológico. En base a esto, se asignó un valor discreto de susceptibilidad, el cual luego fue considerado en la evaluación de susceptibilidad final.

3.6.5. Mapa Inventario de Procesos de remoción en masa

Otro factor condicionante de la ocurrencia futura de movimientos de laderas, es la presencia previa de tales procesos. En éste sentido, se entiende en general que, futuros eventos ocurrirán bajo similares condiciones geo-ambientales que ocurrieron y dieron origen a los eventos del pasado. Esta es una consecuencia del principio del actualismo-uniformitarismo. Un postulado reconocido por todas las evaluaciones funcionales de susceptibilidad/peligrosidad (Carrara *et al*., 1991; Hutchinson, 1995; Aleotti and Chowdhury, 1999; Castellanos Abella and van Westen, 2001; Chung and Fabbri, 2003; Guzzetti *et al*., 1999; 2006; Moreiras, 2004, 2009; Bathrellos *et al*., 2009; Rossi *et al*., 2010; Segura *et al*., 2011; Muñiz *et al.*, 2012).

Al igual que con los otros factores, al mapa de procesos de remoción en masa obtenido previamente, se le asignaron valores discretos de susceptibilidad (en base a la presencia/ausencia de tales procesos), que luego fueron incorporados en la evaluación de susceptibilidad final.

En todas las variables analizadas, el área de la clase/categoría del factor condicionante se obtuvo a partir de la sumatoria de las celdas (píxeles) ocupadas por dicha categoría; mientras que el área de cada categoría del factor afectada por procesos de remoción en masa, se obtuvo a partir de la superposición del mapa temático del factor bajo análisis y una máscara conteniendo sólo con los píxeles positivos para los procesos de remoción en masa.
Las categorías discretas de susceptibilidad asignadas fueron: Bajo=1, Moderado=2 ó Alto=3.

3.6.6. Cobertura Vegetal

Los cambios en la cobertura del suelo pueden deberse a diversos factores, desde desastres naturales, acciones antrópicas hasta políticas públicas o económicas. Identificar, caracterizar y evaluar los cambios en la cobertura/uso del suelo, y su variación a través del tiempo se presenta

como una herramienta muy útil a la hora de desarrollar acciones relacionadas a la planificación del usos del suelo. (Muschong y Sarandón, 2007).

Diversos índices espectrales se han empleado para estudiar la vegetación, uno de los más usados es el Índice de Vegetación Normalizado (*Normalized Difference Vegetation Index*, por sus siglas en inglés) expresado como:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

donde:

NIR = banda del infrarrojo cercano

R = banda del rojo

Este índice permite observar el nivel de crecimiento de la vegetación y sintetiza el resultado de la dinámica del funcionamiento y los patrones debidos a factores físicos, bióticos y disturbios (Paruelo y Lauenroth, 1998; Gurgel *et al*., 2003).

Se analizó la señal del NDVI en la época de la primavera durante el período 1999-2011 en la cuenca del río Tartagal, a fin de representar la dinámica espacio-temporal de la vegetación como indicadora del funcionamiento de la vegetación y explorar algún indicio de la existencia de causa-efecto entre el cambio del bosque y los movimientos de laderas sucedidos especialmente en el año 2009. Para ello, se utilizaron 12 imágenes del sensor LANDSAT (5-TM y 7 ETM), escena 230/076 y una imagen Aster (para completar la serie), de distintas fechas georreferenciadas en UTM zona 20 Sur, provistas (CONAE) y Glovis. Teniendo en cuenta que se usaron sensores ópticos, éste estudio se enfoca en la época de primavera, ya que la cobertura nubosa es menor en ésta estación con respecto al verano, y de esta manera se facilita la interpretación de las imágenes resultantes.

Con el objeto de comparar las imágenes de distintas fechas, se corrigieron atmosféricamente los datos y así eliminar los "ruidos" surgidos en la señal que llega al satélite al atravesar la atmósfera. Se usaron los coeficientes de calibración de Chander *et al.*, (2009) para pasar de Número Digital (DN) a Radiancia y posteriormente, se obtuvieron los valores de reflectividad

con el método de Extracción del objeto obscuro de Chaves (1998), mediante la aplicación del mínimo de banda. Previa a la obtención de las radiancias se unieron y reordenaron las bandas de cada imagen. Para el análisis se desestimó la banda térmica. El valor del NDVI para cada una de las imágenes se obtuvo mediante la función band math del software ENVI 4.7.

El análisis se concentró en las zonas alta y media de la cuenca analizada, ya que en la cuenca baja el bosque ha sido totalmente modificado. Se aplicaron máscaras de los lechos de ríos, lagunas, caminos, ciudades y nubes con el objeto de eliminar los valores negativos del NDVI y de esta manera no incluirlos en las estadísticas.

Se evaluaron distintos atributos del NDVI, tales como mínimo, máximo, promedio y amplitud máxima del NDVI (A-máx.). Este último explica la amplitud ó diferencia entre los valores máximos y mínimos del índice registrados durante un período de tiempo determinado (Iglesias *et al*., 2010). Tales valores de NDVI son indicadores de la mínima y máxima actividad fotosintética. A los efectos de obtener el área cubierta por la vegetación, se tomó como valor umbral de NDVI=0.18 (Martha *et al*. 2010). Las zonas con NDVI mayor a este umbral fueron consideradas en el análisis como zonas vegetadas y aquellas que presentaron un valor igual/inferior fueron excluidas del estudio.

3.7. Zonación de Susceptibilidad por procesos de remoción en masa

La identificación y zonación de la susceptibilidad forman parte de las primeras y más importantes labores en el contexto de prevención y mitigación en la gestión del riesgo (Suarez *et al*., 2009; Martha *et al.*, 2010).

De todos los métodos de mapeo de áreas susceptibles mencionados (Sección 1.3.2.), el método heurístico ha sido ampliamente usado (por ejemplo, Barredo *et al*., 2000; Castellanos Abella y Van Westen, 2008; Bathrellos *et al*., 2009; Ochoa y Lagos, 2010; Segura *et al*., 2011; Muñiz y Hernández, 2012), ya que se presenta como un método rápido, que permite contemplar los diferentes factores como un conjunto que incide en la inestabilidad de las laderas, atributo del cual carecen otros métodos (Ruff y Czurda, 2008).

En este trabajo, la zonación de susceptibilidad por procesos de remoción en masa se obtuvo mediante el método heurístico a través de la combinación de mapas temáticos de los factores condicionantes de tales procesos en un SIG. Dicha combinación consistió en la suma algebraica de cada factor condicionante, ponderado con pesos numéricos específicos y referidos a una grilla común de 12.5 m de pixel, que toma como base la resolución espacial de la topografía digital utilizada.

$$\textbf{Índice de Susceptibilidad (IS)} = a_1 \times F_1 + a_2 \times F_2 + a_3 \times F_3 + a_4 \times F_4 + a_5 \times F_5 \qquad \textbf{(6)}$$

donde:

a_1, a_2,…,a_5: son los pesos numéricos

F_1, F_2,…, F_5: son los factores condicionantes que influyen en la ocurrencia de los movimientos en masa.

Los pesos numéricos de los factores que se consideraron importantes en la ocurrencia de movimientos de laderas (modificados de Castellanos Abella and van Westen, 2001), se jerarquizaron de la siguiente manera: ***(1)*** Geomorfología; ***(2)*** Topografía y, ***(3)*** Geología, y dentro de ellos se asignó un valor a cada variable que lo compone (Tabla 4).

Tabla 4. Pesos asignados a los factores condicionantes de los procesos de remoción en masa de la cuenca del río Tartagal, en el Modelo Heurístico.

Factores	Peso
Geomorfología - Movimientos en masa	0.41
Topografía - Pendiente - Curvatura	 0.23 0.13
Geología - Litología	0.23
Total	**1.00**

Se obtuvo el Índice de susceptibilidad, que luego fue categorizado en tres tipos posibles de susceptibilidad: alto, moderado y bajo. Para la asignación de éstos tres niveles, se evaluaron dos métodos, en función de la significancia que tenían en los mapas finales. Los métodos fueron: ***(1)*** Asignación en base al histograma de la imagen (Método de segmentación del histograma) y, ***(2)*** Asignación en base a igual cantidad de valores en cada categoría analizada (Método de clasificación por quantil (Bathrellos *et al*., 2009).

3.7.1. Validación

De acuerdo a Chung y Fabbri (2003), en los modelos de predicción es importante llevar a cabo la validación de los resultados. Sin alguna clase de validación, el modelo resulta totalmente inútil y tiene poco significado científico. Dado que no se sabe fehacientemente donde ocurrirán los futuros movimientos en masa, lo mejor que se puede hacer es comparar usando una parte al menos, de los movimientos de laderas del pasado.

Para evaluar la precisión del mapa de zonación de susceptibilidad obtenido, se comparó la localización de los procesos de remoción en masa de un evento previo al del año 2009 (evento del 2006), con el mapa de susceptibilidad generado. De esta manera se buscó establecer el grado de coincidencia entre ambos conjuntos de datos; así, se determinó el porcentaje de movimientos de laderas que coincidió con cada uno de los grados o niveles de susceptibilidad

asignados previamente. Cabe señalar que en el proceso de validación, únicamente se consideraron los movimientos de laderas identificados en la cuenca media del mapa de susceptibilidad final, ya que el evento del 2006 ocurrió principalmente en aquella zona y la zonación de susceptibilidad se obtuvo para toda la cuenca.

El mapeo del evento del año 2006, se realizó junto a Francesco Bucci, geomorfólogo del Consiglio Nazionale delle Ricerche-Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeológica (CNR-IRPI), en donde realizó la estadía de especialización en Italia la autora de esta tesis, en el marco de la Maestría AEARTE de CONAE. A tal efecto, la identificación y mapeo se efectuó sobre la imagen de libre acceso de Google Earth de fecha 21/07/2007 (post-evento). Se hizo sobre esta imagen ya que en ese momento no se disponían de otro tipo de datos. Además es de destacar que no existen mapas previos de cartografía de movimientos de laderas para la zona de estudio. Los movimientos de laderas se digitalizaron como polígonos en la imagen del relieve en Google Earth y posteriormente fueron transformados de formato "kml" (del inglés, Keyhole Markup Language) a archivo "shape" mediante el software QGis, con el mismo sistema de referencia y proyección usado en las imágenes digitales a fin de lograr un ajuste espacial entre datos. Luego, estos vectores se superpusieron a las tres categorías de susceptibilidad asignadas y se realizaron los análisis pertinentes.

Capítulo IV

Resultados

4. 1. Identificación y mapeo de procesos de remoción en masa

Las Regiones de Interés (ROIs) de bosques y procesos de remoción en masa utilizadas en la clasificación supervisada, estuvieron representada por 21,048 píxeles (~2 km^2) y por 707 píxeles (0.71 km^2) respectivamente. Ambas ROIs, mostraron una buena separabilidad espectral (Índice de Jeffries-Matusita >1.9; Índice de Divergencia Transformada >1.9 (Figura 29).

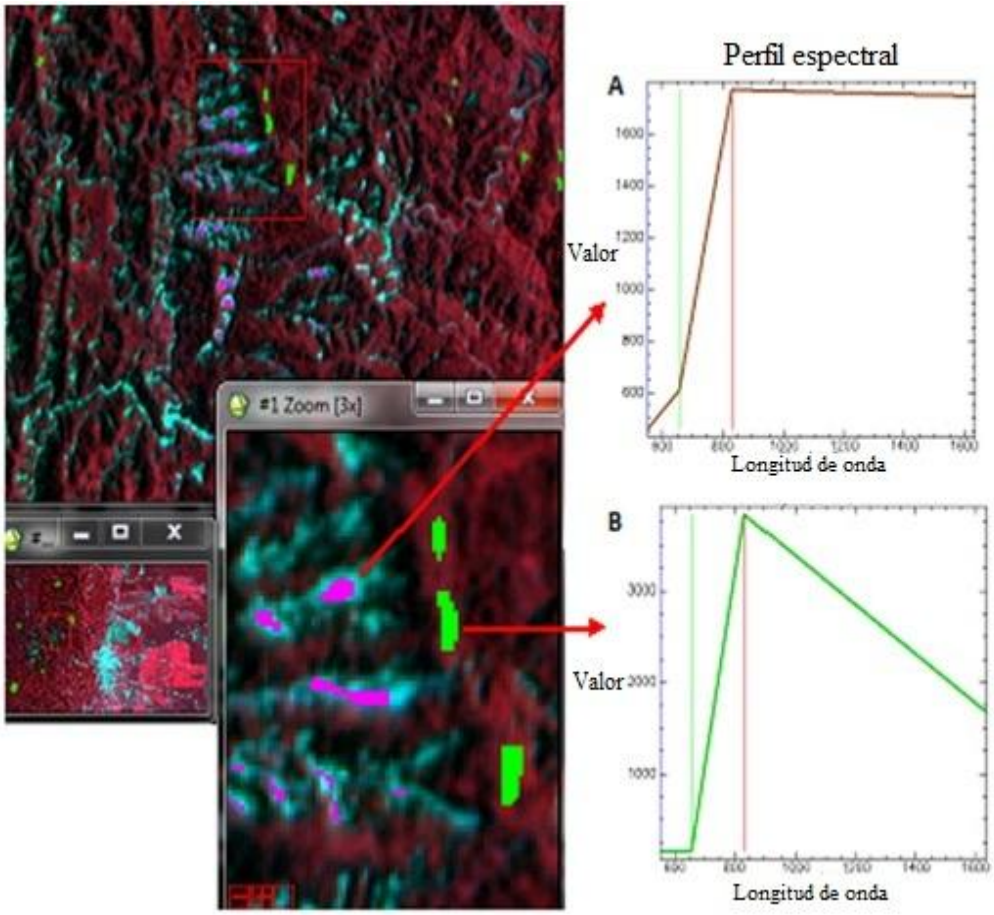


Figura 29. Regiones de Interés (ROIs) registradas en la imagen SPOT-4 y perfil espectral de las ROIs correspondientes a: A) Procesos de remoción en masa y, B) ROI: Bosque.

La clasificación digital basada en píxeles, permitió el efectivo reconocimiento de los procesos de remoción en masa en la cuenca del río Tartagal durante el evento del año 2009, sin embargo en la mayor parte de los movimientos identificados, la técnica empleada no permitió la identificación de los movimientos individuales. En éste sentido, las áreas identificadas como las más grandes correspondieron a más de un tipo de proceso (por ejemplo, deslizamiento, avalancha de detritos, etc.) y por esta razón no fue posible estimar las áreas y volúmenes individuales. En otros casos, la técnica identificó pequeños movimientos fragmentados, que en realidad resultaron ser partes de uno mayor.

El análisis visual y geomorfológico de las clasificaciones resultantes -tras aplicar varios umbrales de clasificación-, reveló que el valor de 0.97 mostró mayor correspondencia entre los movimientos identificados por el método automático y las cicatrices de movimientos visibles en la imagen de trabajo SPOT-4 (Figura 30). Así 29,449 píxeles (aproximadamente 3 km^2) fueron identificados como positivos para movimientos en masa, los cuales estuvieron distribuídos espacialmente en la parte alta y media de la cuenca.

La variación del umbral de clasificación de 0.97 en ± 10%, indicó que el área probablemente afectada por los procesos de remoción en masa del evento 2009, estuvo comprendida entre $3x10^5$ m^2 y $8x10^6$ m^2. En cuanto al volúmen movilizado, éste probablemente osciló entre $3x10^5$ m^3 y $6x10^6$ m^3. La magnitud del evento, podría haber estado entre 5.48 y 6.78 (Tabla 5).

Tabla 5. Número de pixeles identificados como positivos para movimientos en masa, estimación del área afectada, volúmen promedio del material movilizado por los procesos de remoción en masa, y magnitud del evento de Febrero de 2009 en la cuenca del río Tartagal con diferentes umbrales aplicados al algoritmo de clasificación de Máxima Verosimilitud.

Umbral de Clasificación	N° píxeles Clasificados	Área (m^2)	Volúmen Promedio (m^3)	Magnitud ($Log_{10}V_T$)
0.873	77,544	8×10^6	6×10^6	6.78
0.970	29,449	3×10^6	2×10^6	6.30
0.990	3,420	3×10^5	3×10^5	5.48

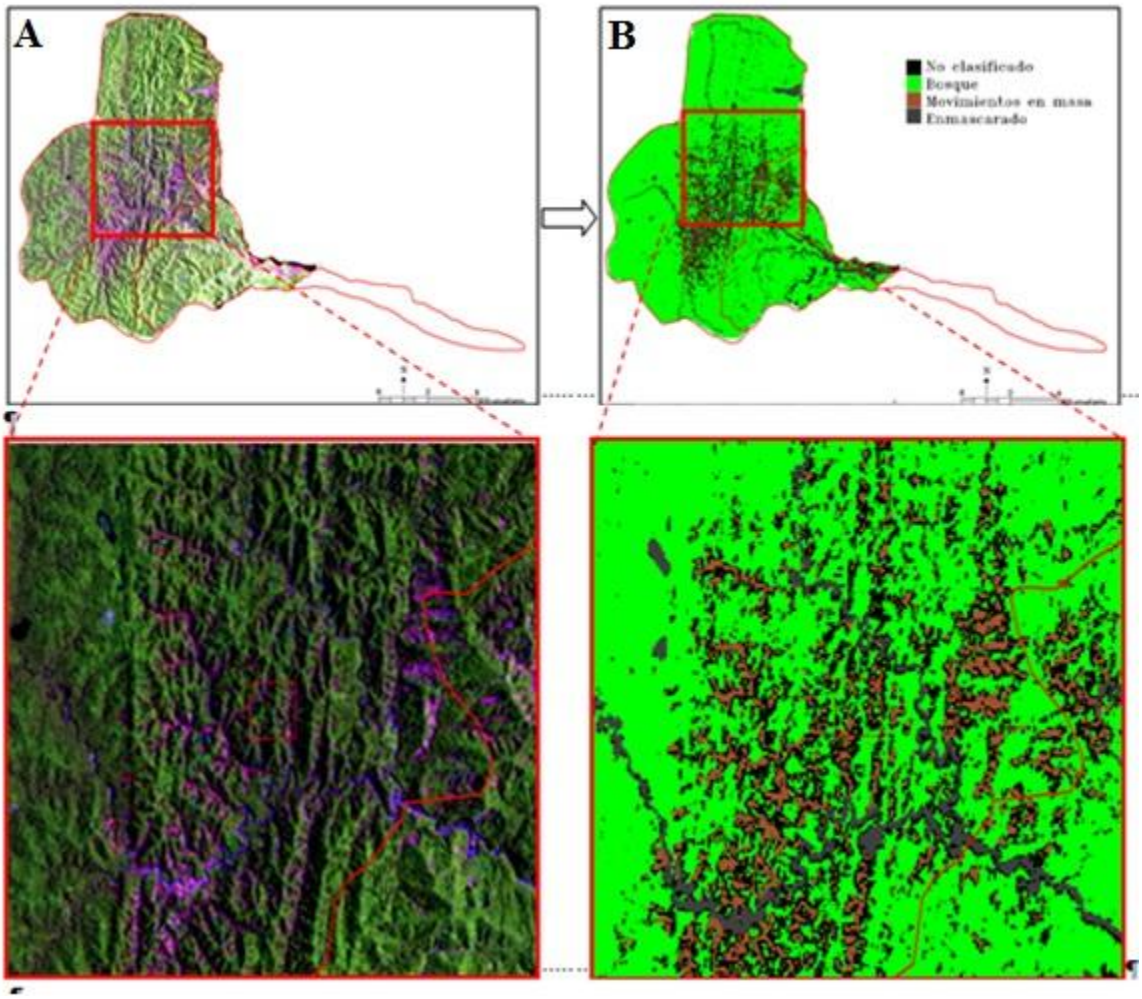


Figura 30. Identificación y mapeo de los procesos de remoción en masa (sin discriminar por tipo), mediante la aplicación del algoritmo de clasificación de máxima verosimilitud con un umbral de probabilidad de 0.97. A) Vista sobre una composición RGB: 431 de la imagen SPOT-4, de fecha 15/02/2009 y, B) Mapa de Clasificación resultante.

En cuanto a la verificación del mapa de procesos de remoción en masa, dada la escasa cantidad de muestras de campo y/o datos espaciales de mayor resolución adquiridos en la época del evento para la validación, no fue posible obtener una matriz de confusión para evaluar la clasificación obtenida. Sin embargo, las cinco muestras de validación a las que se tuvieron acceso, resultaron útiles para tener una primera aproximación de la calidad del mapa resultante.

Un análisis cualitativo revela la existencia de buena correspondencia entre los movimientos clasificados como tales y las cicatrices identificadas en las zonas de la Quebrada del Aguay y Yariguarenda asociadas a los puntos de validación. El clasificador mostró mejor performance al clasificar los movimientos de laderas. Las zonas correspondientes a la vegetación, no fueron clasificadas en su totalidad por el algoritmo (píxeles de color negro) (Figura 31).

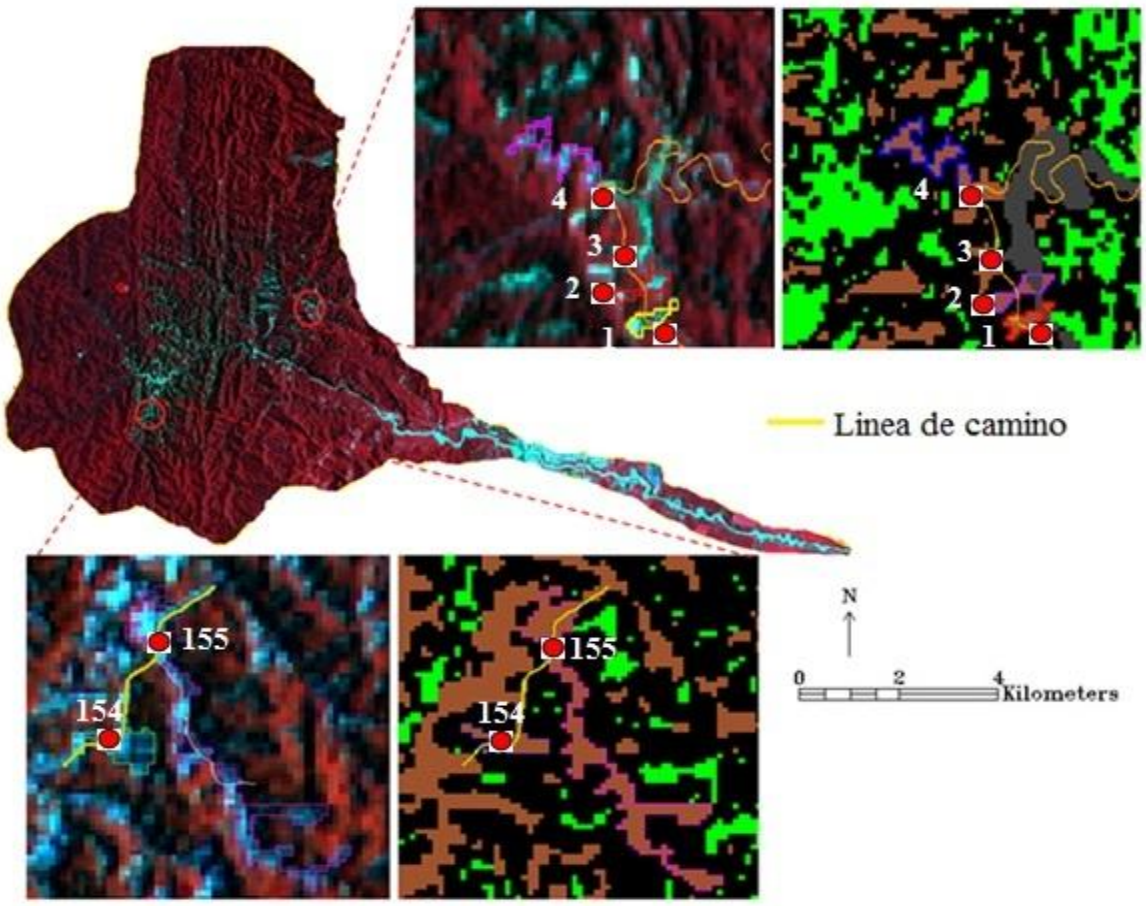


Figura 31. Localización de los puntos de validación (círculos en rojo) y cicatrices de movimientos de laderas asociados a los puntos de validación en dos zonas de la cuenca del río Tartagal (Quebrada del Aguay: Puntos 154 y 155 y Yariguarenda: Puntos. 1, 2, 3 y 4), sobre una combinación RGB: 321 de la imagen SPOT-4, de fecha 15/02/2009 y clasificación resultante.

4. 2. Relación entre factores condicionantes y procesos de remoción en masa

Se analizó un conjunto de factores que condicionan la ocurrencia de los procesos de remoción en masa de la cuenca bajo estudio. Las variables "aspecto" y "cobertura vegetal" , se descartaron del análisis ya que no aportaron resultados significativos. Sin embargo, es preciso aclarar que no se desconoce el importante valor que tienen tales factores condicionantes en la susceptibilidad del terreno. Su relevancia y demás aspectos se discuten en el **Capítulo V**.

4. 2. 1. Pendiente

La cuenca media presentó pendientes mayores a las de la cuenca alta. Así el 90 % de las pendientes de la cuenca media fueron ≤ 30° (media = 16°), mientras que en la cuenca alta, estas resultaron ser ≤ 21° (media = 12°). Los pixeles que resultaron positivos para movimientos en masa, mostraron un patrón similar en ambas cuencas. Asimismo, en las zonas de validación, el patrón se repitió (Tabla 6).

Tabla 6. Medidas de posición (percentiles) y de tendencia central para pendientes (en grados) de la cuenca alta y media del río Tartagal. Referencias: P_x= Percentil x; Q_x= Quartil x.

Cuenca	$P_{25}=Q_1$	$P_{50}=Q_2$	$P_{75}=Q_3$	$P_{90}=Q_4$	Media	Mínimo	Máximo	SD
Alta	7	10	15	21	12	0.8	78	6
Media	8	14	20	30	16	0.8	71	10
Alta y Media	6	11	17	23	13	0.8	78	8
Pixeles positivos para movimientos en masa								
Alta	7	12	16	22	13	0.8	50	7
Media	8	14	21	27	16	0.8	67	10
Alta y Media	7	13	17	23	13	0.8	67	7
Puntos de Validación								
Yarigurenda*	5	13	20	27	14	0.0	66	12
El Aguay **	8	13	18	22	14	12	30	7

* Zona localizada en la Cuenca Media ** Zona localizada en la Cuenca Alta

La reclasificación de las pendientes (Figura 32) reveló que durante el evento del 2009, las áreas propensas a sufrir más movimientos de laderas fueron aquellas con pendientes de bajas a

moderadas (7°-30°), y por tanto se le asignó mayor nivel de susceptibilidad. Las pendientes que superaban los 30° no fueron afectadas por tales procesos (Tabla 7, Figura 34).

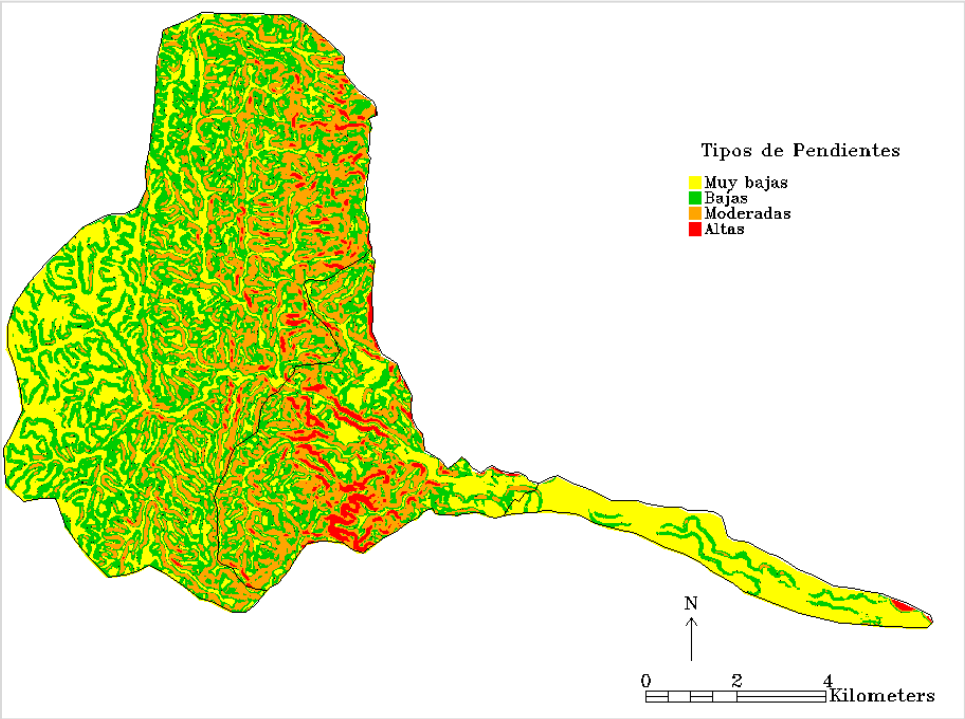


Figura 32. Mapa de pendientes reclasificado, generado a partir del DEM de ALOS de 12.5 m de resolución espacial.

Tabla 7. Relación entre tipos de pendientes y procesos de remoción en masa en el área de estudio y susceptibilidad asignada.

Tipo de Relieve	Pendiente (°)	Área tipo pendiente (km^2)	Área mov. en masa (km^2)	Relación área mov en masa/ área tipo pendiente		Susceptibilidad	
				Proporción	%	Nivel	Categoría
Pendientes muy bajas	0-7	27.17	0.66	0.02	2	1	Bajo
Pendientes bajas	7-15	34.40	1.27	0.04	4	3	Alto
Pendientes moderadas	15-30	22.65	0.93	0.04	4	3	Alto
Pendientes altas	>30	3.03	0.07	0.02	2	1	Bajo

En las zonas que incluyen los puntos de validación, se puso de manifiesto que tanto en Yariguarenda (localizado en la cuenca media) como en El Aguay (situado en la cuenca alta), las pendientes moderadas (15°-30°) fueron las más frecuentes en la ocurrencia de movimientos (Figura 33).

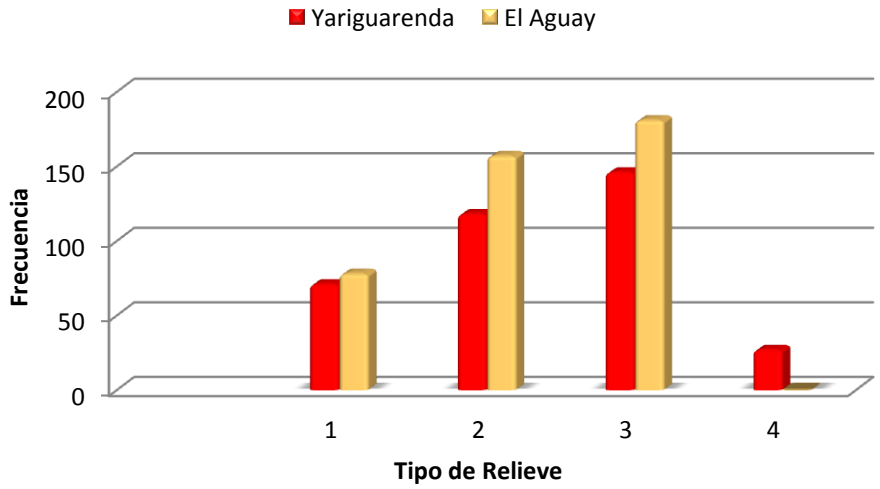


Figura 33. Frecuencia del número de píxeles positivos para movimientos en masa en cada rango de pendientes reclasificado, en las zonas que incluyen los puntos de validación: Quebrada El Aguay Yariguarenda. Ref.: **1.** Pendientes muy bajas; **2.** Pendientes bajas; **3.** Pendientes moderadas; **4.** Pendientes altas.

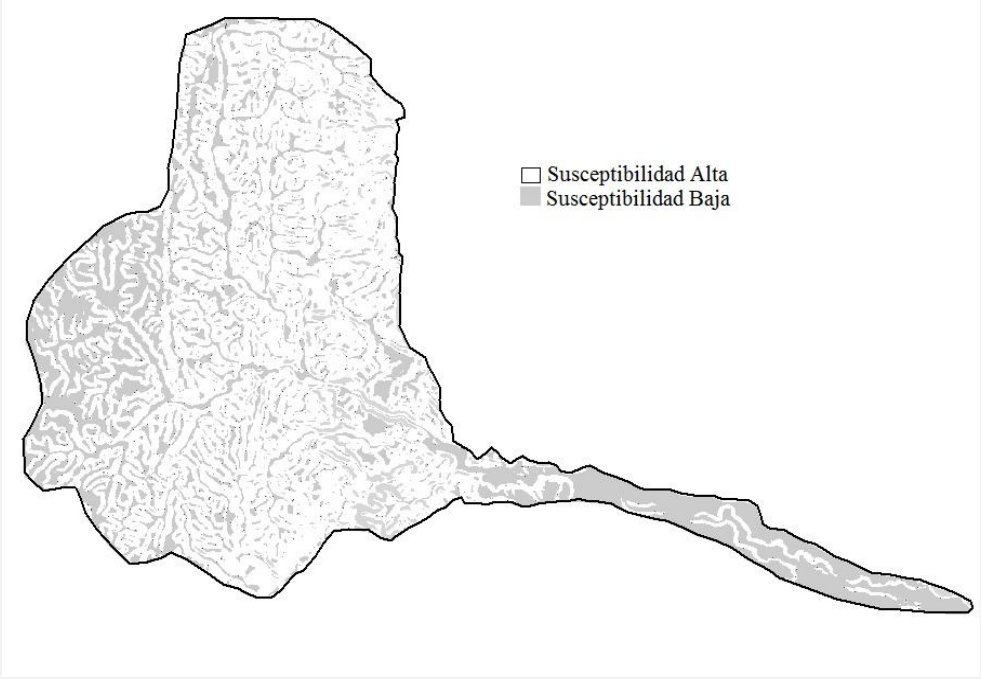


Figura 34. Mapa de Susceptibilidad del terreno debido a la pendiente.

4. 2. 2. Curvatura

Se obtuvo un mapa de curvatura de la cuenca del río Tartagal. Los valores oscilaron entre -3.40 a +3.40. La curvatura negativa cubrió la mayor parte de la superficie y es allí en donde ocurrieron la mayor proporción de procesos de remoción en masa (4.2 %). Por lo tanto, se le asignó el nivel de susceptibilidad más alto. En las curvaturas planas y positivas ocurrieron menor proporción de movimientos de laderas, por lo que se les asignaron niveles de susceptibilidad moderado y bajo respectivamente (Tabla 8, Figura 35).

Tabla 8. Relación entre tipos de curvaturas y procesos de remoción en masa en el área de estudio y susceptibilidad asignada.

Tipo de curvatura	Área tipo curvatura (km^2)	Área mov. en masa (km^2)	Relación área mov. en masa/área tipo curvatura		Susceptibilidad	
			Proporción	%	Nivel	Categoría
Negativa (Cóncava)	51.92	2.16	0,042	4.2	3	Alto
Plana	15.51	0.49	0,032	3.2	2	Moderado
Positiva (Convexa)	14.63	0.30	0,021	2.1	1	Bajo

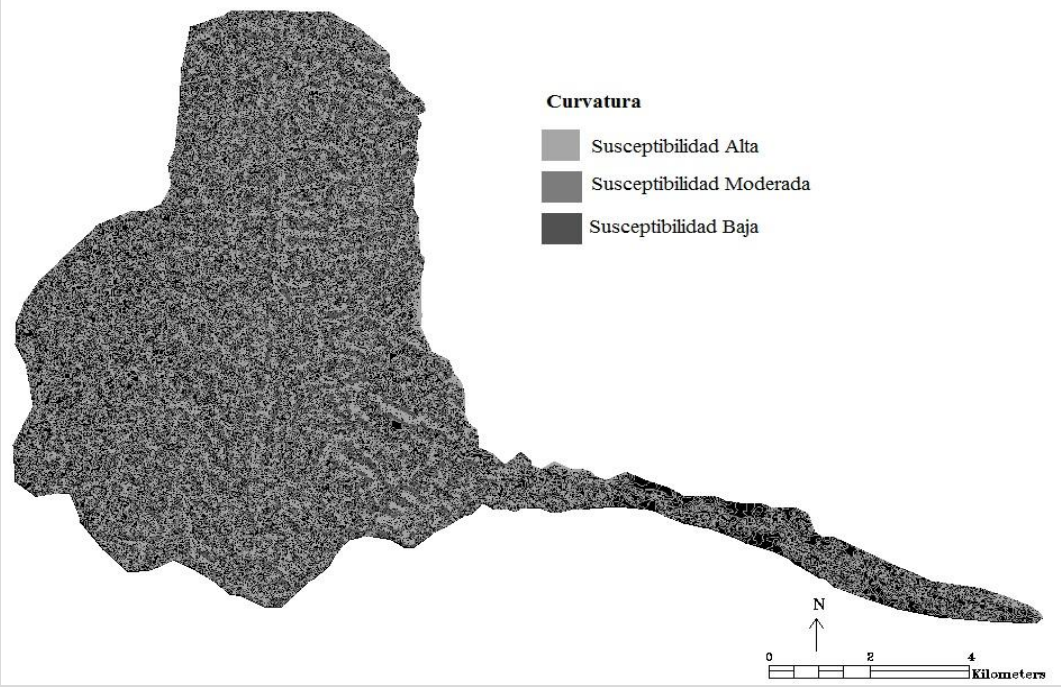


Figura 35. Mapa de Susceptibilidad del terreno debido a la curvatura.

4. 2. 3. Litología

La superposición de la litología característica de la cuenca del río Tartagal con los movimientos en masa identificados en el evento 2009 (Figura 36), reveló que las areniscas deleznables (pertenecientes al Grupo Cuevo, Tacurú, Formación Tranquitas) y las areniscas limosas y pelitas subordinadas (correspondientes al Terciario Subandino), presentaron la mayor superficie afectada por procesos de remoción en masa (Figura 37) y además la proporción entre el área ocupada por los movimientos de laderas y el área de estos tipos litológicos fue la más alta, por lo tanto, a estas dos formaciones se le asignó el nivel mayor de susceptibilidad.

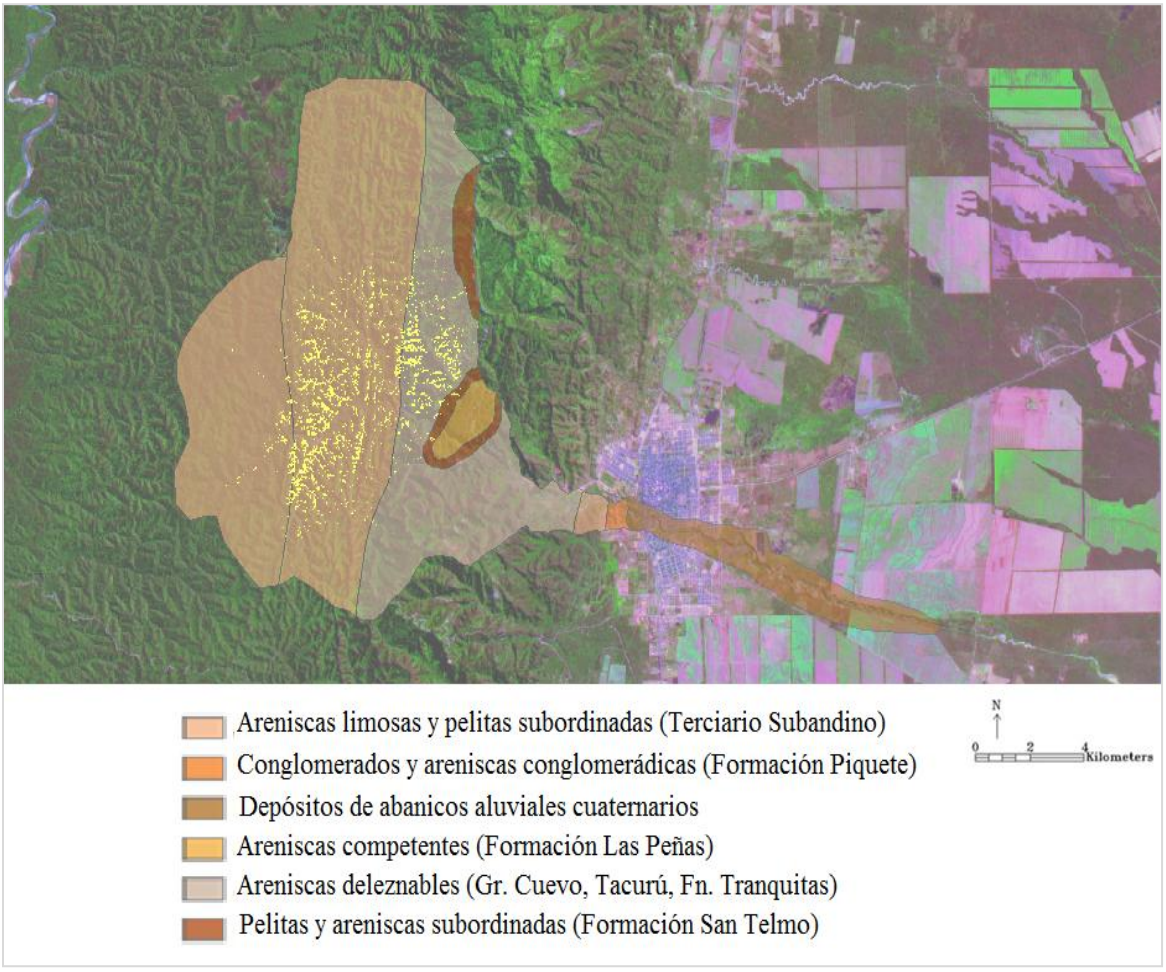


Figura 36. Mapa Litológico de la cuenca del río Tartagal, Salta y movimientos en masa identificados en cada tipo litológico (en amarillo), sobre una composición color RGB: 431 de la imagen ASTER, de fecha: 09/04/2004.

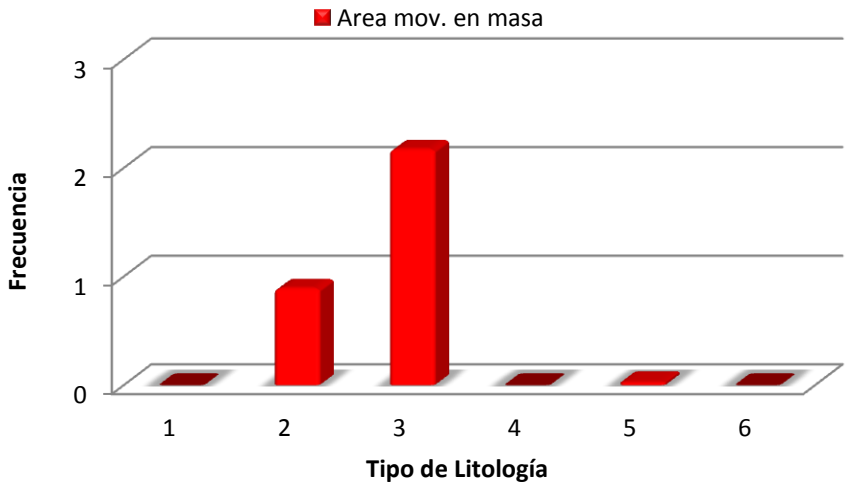


Figura 37. Frecuencia del área de los movimientos en masa identificados en cada grupo litológico del área de estudio. Referencias: **1.** Areniscas competentes (Formación Las Peñas); **2.** Areniscas deleznables (Gr. Cuevo, Formación Tacurú, Tranquitas); **3.** Areniscas limosas y pelitas subordinadas (Terciario Subandino); **4.** Depósitos de abanicos aluviales cuaternarios; **5.** Pelitas y areniscas subordinadas (Formación San Telmo); **6.** Conglomerados y areniscas conglomerádicas (Formación Piquete).

Dado que los depósitos de abanicos aluviales cuaternarios, las areniscas competentes de la Formación Las Peñas y los conglomerados y areniscas conglomerádicas de la Formación Piquete no presentaron procesos de remoción en masa, se les asignó el nivel de susceptibilidad más bajo. En cambio, en las pelitas y areniscas subordinadas de la Formación San Telmo, se reconoció la más baja superficie de cobertura de movimientos en masa (0.03 km^2) y por tanto se estableció un valor moderado de susceptibilidad (Tabla 9, Figura 38).

Tabla 9. Relación entre tipos de litologías y procesos de remoción en masa en el área de estudio y susceptibilidad asignada.

Tipos de Litología	Área litología (km^2)	Área mov. en masa (km^2)	Relación área mov. en masa/ área litología		Susceptibilidad	
			Proporción	%	Nivel	Categoría
Areniscas competentes (Formación Las Peñas)	1.66	0.00	-	-	1	Bajo
Areniscas deleznables (Gr. Cuevo, Tacurú, Fn. Tranquitas)	25.63	0.89	0,04	4	3	Alto
Areniscas limosas y pelitas subordinadas (Terciario Subandino)	54.65	2.17	0,04	4	3	Alto
Depósitos de abanicos aluviales cuaternarios	6.87	0.00	-	-	1	Bajo
Pelitas y areniscas subordinadas (Formación San Telmo)	2.90	0.03	0.01	1	2	Moderado
Conglomerados y areniscas conglomerádicas (Formación Piquete)	0.37	0.00	-		1	Bajo

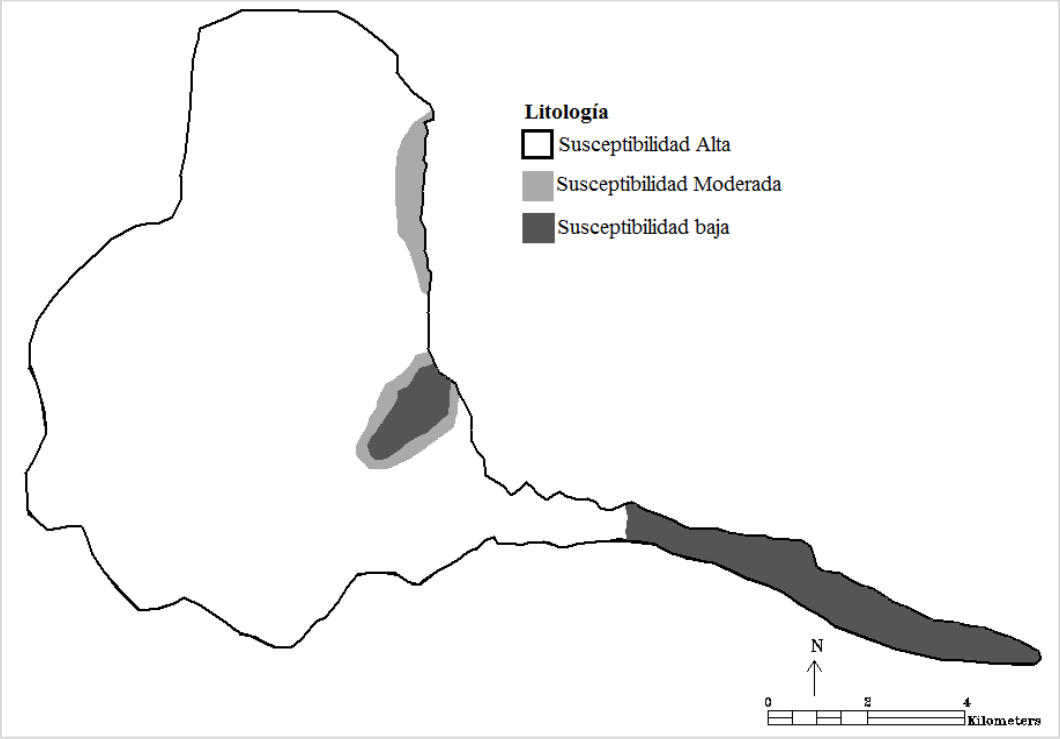


Figura 38. Mapa de Susceptibilidad del terreno debido a la litología.

4. 2. 4. Mapa Inventario de Procesos de remoción en masa

El mapa de distribución espacial de procesos de remoción en masa, obtenido automáticamente por la clasificación supervisada, sirvió de base para la asignación de las clases de susceptibilidad. Así, a las zonas donde se detectó la presencia de movimientos de laderas se les asignó la categoría de alta susceptibilidad, mientras que al resto del terreno, baja susceptibilidad (Tabla 10, Figura 39).

Tabla 10. Susceptibilidad asignada a la presencia/ausencia de los procesos de remoción en masa del evento del año 2009 en el área de estudio.

Procesos de remoción en masa	Área (km^2)	Susceptibilidad	
		Nivel	Categoría
Presentes	3.00	3	Alto
Ausentes	86.21	1	Bajo

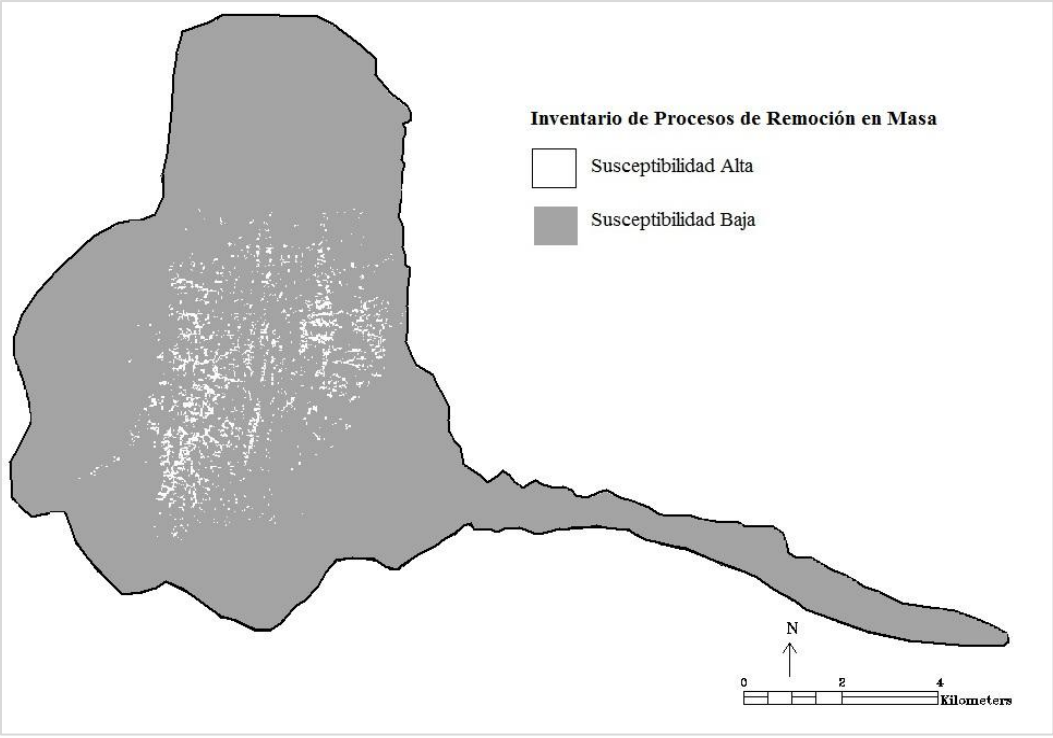


Figura 39. Mapa de Susceptibilidad del terreno debido a la presencia de procesos de remoción en masa.

4. 3. Zonación de Susceptibilidad por procesos de remoción en masa

El índice de susceptibilidad obtenido, posibilitó generar un mapa final cuyos valores oscilaron entre 0.41 y 3.00 (Media= 1.82; Desv. Standard= 0.37). Dicho mapa se recategorizó en 3 zonas, mediante el método basado en la segmentación del histograma, que demostró tener mayor significado en terreno. Así, el mapa final de susceptibilidad resultó con los siguientes valores y categorías:

0.41-1.30: Susceptibilidad Baja
1.30-2.13: Susceptibilidad Moderada
2.13-3.00: Susceptibilidad Alta

El mapa final de zonación de susceptibilidad por procesos de remoción en masa (Figura 40), evidenció que el 37.52% de la superficie de la cuenca presentó susceptibilidad de moderada a baja, mientras que la susceptibilidad alta registró un 62.48 % (tabla 11).

Tabla 11. Superficies resultantes del modelo de zonificación de susceptibilidad por procesos de remoción en masa en la cuenca del río Tartagal.

Susceptibilidad	Superficie (Km^2)	Superficie Total (%)
Baja	13.44	15.07
Moderada	20.03	22.45
Alta	55.74	62.48
Total	**89.21**	**100**

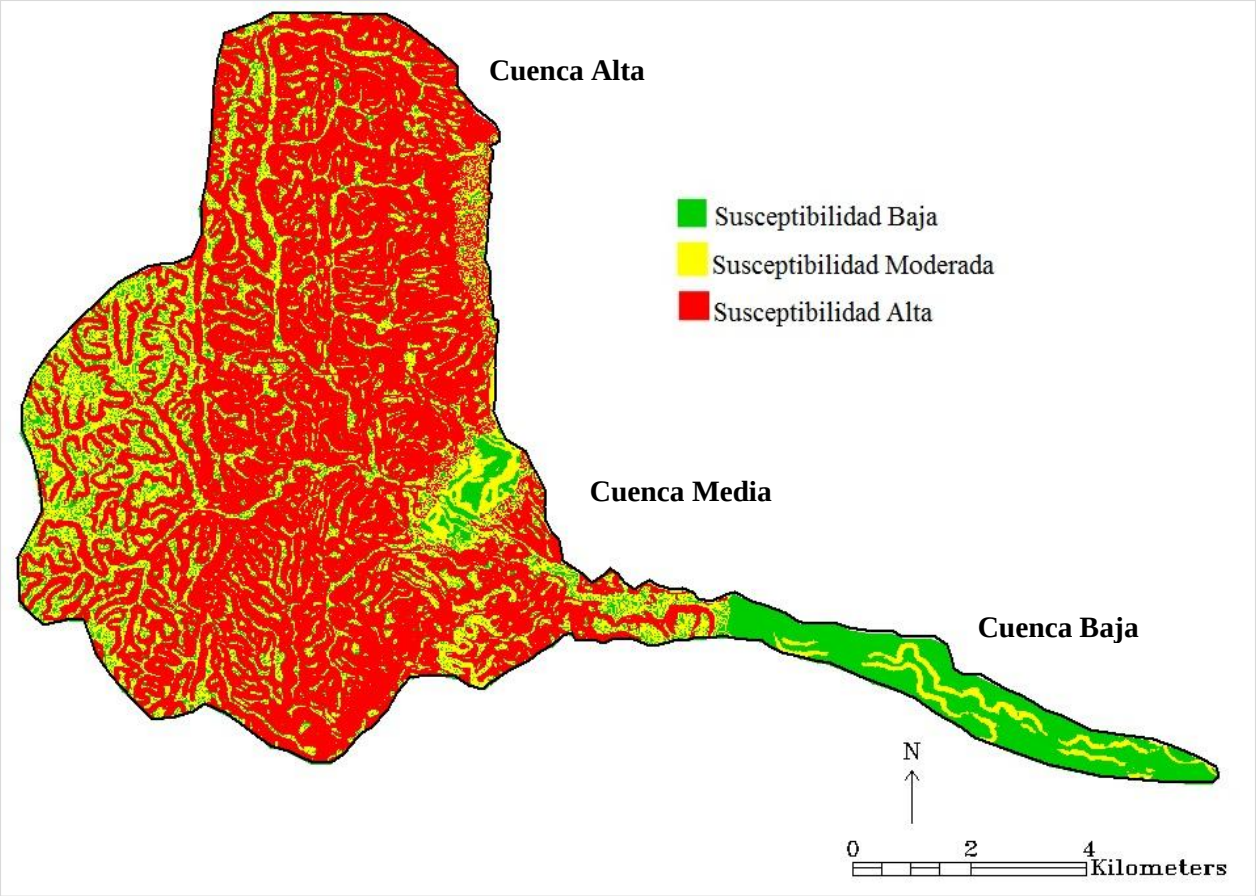


Figura 40. Mapa de zonación de susceptibilidad por procesos de remoción en masa, obtenido mediante el Método Heurístico, con la incorporación de los mapas temáticos de litología, pendientes, curvatura e inventario de procesos de remoción en masa.

4. 3. 1 Validación

Se identificaron y mapearon 277 procesos de remoción en masa frescos, correspondientes al evento del año 2006. Los mismos representaron un área de 0.31 km^2 y estuvieron localizados sobre todo en la parte media de la cuenca bajo estudio (Figura 41).

La superposición de los movimientos de laderas identificados en el evento 2006 con el mapa de susceptibilidad final reveló que el 75.39 % de los movimientos ocurrieron en las zonas clasificadas como de "alta susceptibilidad", el 21.12 % en zonas de "moderada susceptibilidad" y el 3.48 % en zonas de "baja susceptibilidad" (Figura 42).

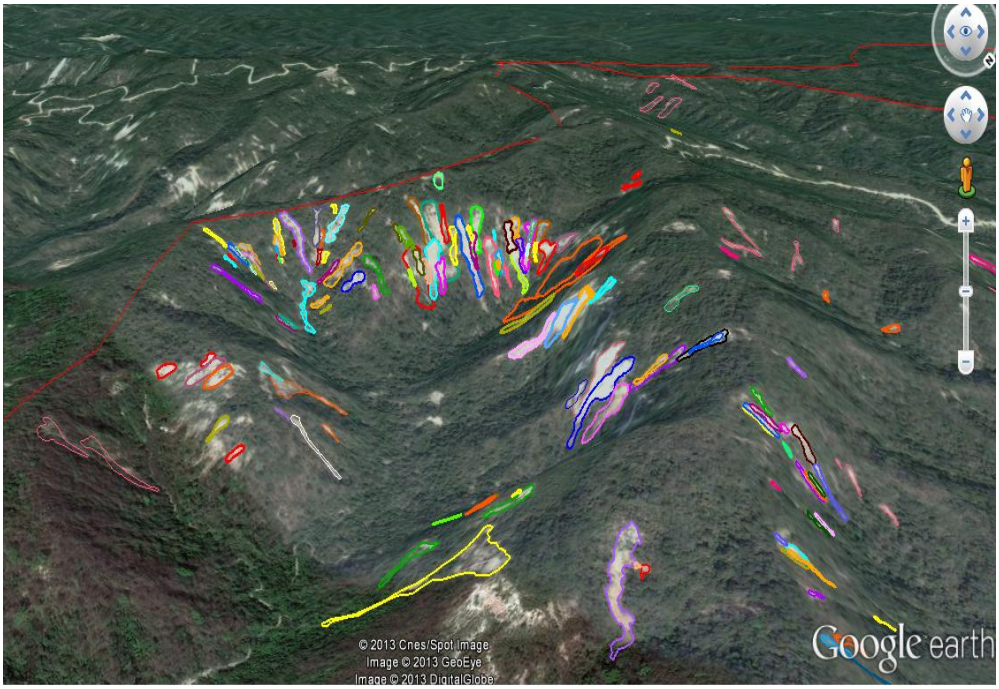


Figura 41. Vista 3-D de parte de los procesos de remoción en masa del evento del año 2006 digitalizados en la imagen de relieve de Google Earth, de fecha: 09/10/2006.

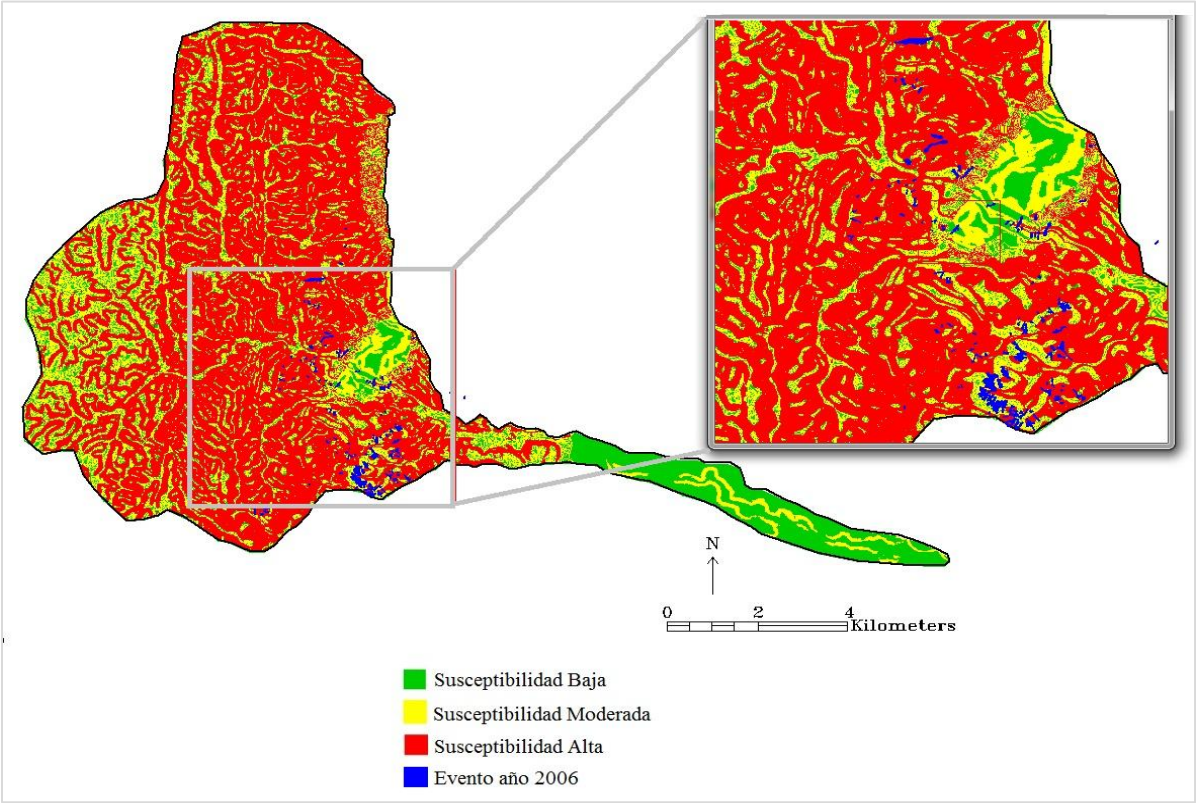


Figura 42. Superposición de las categorías del mapa de zonación de susceptibilidad y procesos de remoción en masa identificados (evento del año 2006) en la cuenca media del río Tartagal.

Capítulo V

Discusión

5.1. Identificación y Mapeo de Procesos de Remoción en Masa

Los mapas de procesos de remoción en masa pueden ser preparados usando diferentes técnicas (Guzzetti, 2006). De acuerdo con Guzzetti *et al*., (2000) y van Westen *et al*., (2000), la selección de una técnica depende del propósito del inventario, la extensión del área de estudio, la escala y resolución de las imágenes disponibles, los objetivos, la experiencia de los investigadores y los recursos disponibles para realizar el trabajo. En este estudio, se utilizó el método automático de clasificación supervisada, para la localización de los movimientos de laderas a escala de cuenca. En comparación con la interpretación visual y mapeo manual, la técnica empleada facilitó la identificación rápida de los movimientos en masa del área de estudio. Esta es una característica apreciada particularmente por los agentes responsables de la gestión del riesgo y del proceso de toma de decisiones, que valoran la obtención de resultados rápidos.

Las técnicas de clasificación basadas en el patrón de la respuesta espectral por píxel han sido cuestionadas por varios autores, aduciendo que poco se relacionan con los procesos geomórficos complejos, como lo son los procesos de remoción en masa (McDermid and Franklin, 1995; Barlow *et al*., 2006, Martha *et al*., 2010) y además tales técnicas no permitirían la correcta discriminación ya que se confunden con otras superficies similares espectralmente, como por ejemplo zonas áridas (Sauchyn and Trench, 1978; Epp and Beaven, 1988). En este sentido, los resultados obtenidos muestran que es posible tomar sólo la firma espectral del píxel para el reconocimiento de los movimientos de laderas, mientras se enmascaren otros elementos del paisaje que presenten características espectrales similares y que puedan comprometer la precisión de la detección. Si se reconoce, que el conocimiento experto es crucial para la caracterización final de los movimientos en masa, es decir para otorgarle validez en el contexto geomórfico del paisaje (por ejemplo, en este estudio la clasificación supervisada identificó movimientos en masa pequeños que podrían dar a entender que corresponden a pequeños procesos individuales, sin

embargo si se analiza el contexto geomorfológico, corresponderían a porciones de un mismo movimiento). Sin embargo, el mencionado conocimiento experto, también es requerido en otros métodos por ejemplo, en el "método orientado al objeto", usado recientemente por varios autores y que actualmente está "de moda" en la comunidad científica (Martha *et al*., 2010). Dicho método resulta atractivo dado que incorpora y relaciona información espectral, morfométrica y características diagnósticas contextuales de los movimientos en masa basado en el conocimiento experto, sin embargo el método no se encuentra siempre disponible dado los altos costos del software que utiliza, lo cual limita su aplicación.

Es sabido que la posibilidad de reconocimiento de los procesos de remoción en masa en imágenes digitales depende en gran medida de la resolución espacial de la imagen en relación con el tamaño de los movimientos en masa (van Westen and Soeters, 2000; Fiorucci *et al.*, 2011). La imagen multiespectral SPOT-4 de 10 m de resolución espacial, resultó suficiente para identificar los movimientos existentes. Sin embargo, es posible que existan movimientos menores a 100 m^2, que el tamaño del píxel usado no permitió localizar. Esta idea surge a partir del mapeo de movimientos de laderas del evento sucedido en el año 2006, el cual indicó la existencia de movimientos mayores y algunos menores a 100 m^2 (Cardozo *et al*., en prensa). De acuerdo con Van Westen *et al*., (2008) si bien este tipo de imagen es útil en la identificación de los procesos de remoción en masa, resulta insuficiente para determinar las características y el tipo del movimiento en masa, por lo que sería necesario usar otros tipos de datos de mayor resolución espacial y/o espectral para este fin.

De acuerdo con Guzzetti *et al*., (2005) es necesario chequear la clasificación obtenida de los procesos de remoción en masa con una fuente externa de información. Lamentablemente para la validación no hubo disponibilidad de otras fuentes de datos de mayor resolución para la fecha del evento, sin embargo aunque los cinco puntos de validación con los que se contó resultaron exiguos, permitieron establecer la existencia de una buena correspondencia entre las cicatrices de los movimientos de la imagen de trabajo y los resultados de la clasificación al cual hacían referencia tales puntos. Es necesario reconocer que probablemente el proceso de clasificación automática se vió limitado por la presencia de sombras en la imagen SPOT-4, y podría haber generado una subestimación de las áreas en donde ocurrieron los procesos de remoción en masa.

En éste sentido, futuros estudios podrían explorar los efectos de la extracción de sombras en la determinación de los movimientos de laderas por métodos automáticos y semiautomáticos.

5. 2. Área, Volúmen y Magnitud del evento 2009

De acuerdo con Guzzetti *et al.*, (2009) el conocimiento del número, área y volumen de los movimientos en masa de una determinada zona es importante para evaluar la evolución de los paisajes dominados por éstos procesos a largo plazo y para la determinación de la peligrosidad y riesgo asociado.

En muchas partes del mundo y Tartagal no es la excepción, los procesos de remoción en masa ocurren en grupos. La técnica empleada en este estudio, no permitió identificar los movimientos en masa individuales del grupo y por ende no fue posible calcular áreas y volúmenes individuales, ni sus estadísticas asociadas. Sin embargo se estimaron valores totales. Cabe destacar que no es tarea fácil determinar el volúmen de los movimientos individuales. En este sentido Jacob (2005), sostiene que el desafío de lograrlo es determinar cuál falla ocurrió durante un evento específico ya que en ambientes tropicales y subtropicales, múltiples fallas son comunes en una misma cuenca. Por tanto, si bien se presentan resultados generales, éstos hacen un gran aporte al conocimiento de éste evento en particular y sientan una base para futuros estudios que centren su mirada en la modelización hidráulica y de inundaciones, entre otros. Asimismo, el análisis volumétrico que se presenta será útil en la implementación de estrategias de gestión del riesgo. Los resultados revelan que la magnitud probable del evento estuvo comprendida entre 5.48 y 6.78 y que tanto el rango del área total afectada como del volúmen de material total removido en la cuenca del río Tartagal, estuvieron comprendidos probablemente entre los órdenes de magnitud de 10^5 y 10^6. Estos datos apoyan las consecuencias potenciales sugeridas por Jacob, (2005) para éste rango de valores de área y volúmen. Así, el evento sería de clase 6 de magnitud (de las 10 posibles) y podría destruir ciudades, arrasar valles y represas de ríos. De hecho, algo similar, es lo que sucedió en el evento del año 2009, en el cual hubo daños en gran parte de la ciudad de Tartagal (afectó a numerosos barrios y destruyó totalmente aproximadamente 30 viviendas), dejó un saldo de 1,000 evacuados, más de 30,000 damnificados

y 2 personas perdieron la vida en un lapso que no superó la media hora (Fuente: Diario El Tribuno de Salta, fecha 10 febrero de 2009).

El volúmen del material movilizado, calculado a partir del inventario de procesos de remoción en masa, está en el mismo orden de magnitud (10^6 m^3) que el volumen de sedimento que se depositó en la ciudad de Tartagal luego del alud (Baumann *et al*., 2009). Estos datos ponen en evidencia una correspondencia entre el material erosionado en las cuencas alta y media del río Tartagal y el depósito en el pié del abanico.

La variación de los umbrales del algoritmo de clasificación, resultó una buena opción para describir el evento del 2009, dado que proporcionó evidencias de sus características intrínsecas, tales como área afectada, volúmen removido y dimensión. Todas son cualidades importantes de conocer en el contexto de la gestión del riesgo por desastres naturales.

5.3. Zonación de Susceptibilidad por procesos de remoción en masa

Se presenta el primer mapa de zonación de susceptibilidad por procesos de remoción en masa en la cuenca del río Tartagal (Salta), realizado mediante la aplicación del método heurístico. El mismo, mostró resultados aceptables -en comparación a lo obtenido por otros autores- ya que más del 75 % de los movimientos en masa de validación fueron detectados en la zona de alta susceptibilidad, mientras que Segura *et al*., (2011) obtuvieron una confiabilidad del 48.4% correspondiente a áreas de susceptibilidad alta y moderada. Es de destacar que los mejores resultados obtenidos hasta el momento en la literatura, muestran que sólo el 80% de las unidades de terreno pueden ser clasificadas apropiadamente según su grado de inestabilidad (Baeza y Corominas 2001). De acuerdo a Moreiras, (2009) ésto posiblemente se deba a la falta de comprensión de los mecanismos naturales que actúan.

El tipo litológico, las pendientes, curvaturas y la presencia de movimientos de laderas ejercieron un control importante en los niveles de susceptibilidad obtenidos en el mapa final. De este modo, las zonas de alta susceptibilidad se localizaron en más de la mitad de la cuenca, específicamente en las partes alta y media de la misma, asociados probablemente con las litologías más sensibles a la erosión (Terciario Subandino y Formación Tranquitas); con pendientes moderadas/bajas,

curvaturas negativas y con movimientos de laderas identificados en ese área. Las zonas de moderada y baja susceptibilidad estuvieron presentes en toda la cuenca en menor proporción, y probablemente los factores que más incidieron en los resultados obtenidos fueron la litología (los grupos más resistentes a la erosión), las pendientes y las zonas boscosas en donde no se registraron movimientos de laderas durante el evento del 2009.

El análisis heurístico es considerado un método cualitativo ponderado (Van Westen, 1993) y en este estudio permitió analizar los factores que incidieron en la inestabilidad de las laderas. Sin embargo es necesario reconocer la subjetividad que presenta dado que depende de la experiencia y conocimiento del experto en la correcta elección de los factores condicionantes que integran el modelo y de la adecuada asignación de los pesos para cada uno de tales factores. En este sentido, es sabido que la estimación de la susceptibilidad mejora cuando se consideran los factores que reflejan más adecuadamente el comportamiento de las laderas, sin embargo de acuerdo con Moreiras, (2009) no todas las variables posibles de incorporar, tienen un carácter predictivo significativo. En el presente estudio, en función del conocimiento de campo que se tiene de la zona, se analizaron las principales variables condicionantes de los procesos de remoción en masa. Así, litología, pendientes, curvatura y localización de movimientos en masa fueron reconocidos como cuatro de los factores más importantes a ser tenidos en cuenta en el comportamiento de las laderas de la cuenca bajo estudio. De acuerdo a Suarez *et al*., (2011) el inventario de movimientos en masa es considerado por sí mismo un mapa de susceptibilidad aunque debe ir de la mano de una caracterización geomorfológica, ya que los factores geomorfológicos como la geometría de las laderas (grado de pendiente, forma, aspecto, etc.) y las características de la cuenca (orden, magnitud, gradiente, etc.), reflejan la evolución geomorfológica y brindan información fundamental sobre los procesos de remoción en masa (Carrara *et al*., 1995).

Bonorino *et al.*, (2001) sugieren que dada la condición friable de las areniscas del Subgrupo Terciario Subandino, sumado al aporte que hace el clima húmedo tropical, favorecen la meteorización química y el desarrollo de un potente regolito que es propenso a ser removido por movimientos en masa, reptación y flujos densos. De acuerdo a esto, los resultados obtenidos,

revelan la incidencia de este tipo litológico junto al de la Formación Tranquitas, en la ocurrencia de los movimientos de laderas sucedidos en el evento bajo análisis, que sumado a la intensidad de las precipitaciones (aproximadamente 95 mm/8 hs. del día 09 de febrero) (Barbeito *et al*., 2009), desencadenaron el alud que afectó a la población e infraestructuras de la ciudad de Tartagal, localizada en la cuenca baja.

Es de destacar que las pendientes de las laderas en el tipo litológico Terciario Subandino, son de bajas a moderadas (de 7° a 30°). Dado el tipo de relieve, las pendientes mayores a 30° ocurren en la cuenca media sobretodo, en la cual la litología predominante es la de la Formación Tranquitas. Esto se debe a la presencia de un anticlinal, un gran pliegue que atraviesa el sector medio de la cuenca en el cual afloran rocas más antiguas (del Carbonífero). Se sabe que donde existe mayor probabilidad de inestabilidad de laderas es donde ocurren pendientes altas, por tanto se hubiera esperado mayor proporción de movimientos de laderas en la Formación Tranquitas. Sin embargo los datos obtenidos, ponen de manifiesto que el rango de pendientes mayores a 30° fue el menos afectado por los movimientos de laderas, probablemente debido a la escasa distribución de tales pendientes en la cuenca alta (zona principal en la que ocurrió el evento bajo análisis). Así, los datos confirman que en el año 2009, fue suficiente la combinación de tipos rocosos poco consolidados, fácilmente erosionables, como los del Terciario Subandino y la gran cantidad de agua caída en poco tiempo en la cuenca alta, para que los movimientos en masa acontecieran sobretodo en aquella zona. Lo que esperábamos si sucedió en 2006, año durante el cual ocurrieron precipitaciones masivas durante varias semanas en todo el área de estudio, desencadenando procesos de remoción en masa en esa zona de altas pendientes y sustrato erosionable (cuenca media).

Otra variable que puede incidir en la inestabilidad de las laderas, es la orientación de las pendientes. Dada la configuración de las Sierras Subandinas, se esperaría que al interceptar los vientos húmedos del Atlántico y condensar la humedad en forma de lluvia orográfica, los faldeos orientales resulten más húmedos que el resto y así presenten mayor proporción de procesos de remoción en masa. Se analizó esta variable, y los resultados no permitieron establecer la categoría de mayor susceptibilidad en la orientación “Este” ni en ninguna otra (Tabla 12), es decir que no aportó información relevante, por lo que fue descartada del análisis. De acuerdo con

Moreiras, (2009) si se tuvieran registros históricos de las cicatrices o zona de arranque de los procesos de remoción en masa, sería posible inferir sobre las orientaciones de las laderas más favorables en el pasado, para la generación de estos procesos y a partir de ésta información lograr determinar la/las orientación/es que ha/han sido claves en la inestabilidad de las laderas.

Tabla 12. Tipos de orientación de las laderas y su relación con los movimientos en masa (en término de áreas) en la cuenca del río Tartagal.

Orientación	Área tipo Orientación (Km^2)	Área mov. en masa (Km^2)	Relación entre área mov. en masa/área del tipo de orientación	
			Proporción	%
Norte	10.36	0.34	0.03	3
Noreste	10.25	0.36	0.04	4
Este	10.47	0.45	0.04	4
Sureste	9.16	0.38	0.04	4
Sur	10.85	0.40	0.04	4
Suroeste	11.06	0.35	0.03	3
Oeste	10.71	0.34	0.03	3
Noroeste	9.16	0.30	0.03	3

En cuanto al factor condicionante "Cobertura vegetal", se estudió la posibilidad de incorporar el índice NDVI en el modelo de susceptibilidad desarrollado, ya que de acuerdo con Minetti (2005) la vegetación al fijar el suelo, contribuye sustancialmente a bajar el riesgo de ocurrencia de movimientos en masa. Además, es importante considerar el cambio temporal de la masa vegetal, teniendo en cuenta las múltiples e históricas intervenciones antrópicas (tala selectiva no planificada, deforestación, sobrepastoreo, actividad petrolera, etc.), que la han afectado e indirectamente han generado un perjuicio sobre el ciclo hidrológico de la cuenca del río Tartagal. Los resultados obtenidos del análisis de la variación interanual del NDVI, no permitieron establecer diferencias sustanciales en el período 1999-2011. Los datos encontrados revelan la existencia de un patrón oscilatorio del comportamiento de la biomasa vegetal, acoplado a la oscilación de las precipitaciones. Esto está de acuerdo con lo mencionado por Hill y Donald (2003), quienes sostienen que en aquellas regiones en las que se exhibe una estacionalidad bien definida de sus condiciones climáticas -tal como sucede en Tartagal-, el NDVI se expresa a través del tiempo por medio de ondas que acompañan de manera estrecha la variación interanual del crecimiento de la vegetación.

Cabe mencionar que se arribó a estos resultados a partir de los datos de las imágenes LANDSAT, utilizando un índice como el NDVI, que es y ha sido ampliamente usado y probado por varios autores. De ninguna manera nuestros datos sugieren que la variable "Cobertura vegetal" carece de relevancia para ser incorporada en el modelo de susceptibilidad del terreno por procesos de remoción en masa. Al contrario, dada la importancia que se reconoce que tiene como agente regulador y en el contexto de los procesos erosivos, en particular en lo que respecta a los movimientos de laderas; se lo ha incorporado en los análisis junto a otros factores condicionantes. Sin embargo, los resultados a los que arribamos no nos permitieron llegar a una conclusión sólida que admita decidir su inclusión en el modelo heurístico para la elaboración del mapa de susceptibilidad en cuestión. Sería recomendable que posteriores estudios consideren la adquisición de datos de archivo de sensores ópticos de alta resolución espacial y/o datos de radar en forma sistemática para seguir evaluando esta variable. En este sentido, cabe señalar que la disponibilidad de este tipo de archivos es limitada en general

En cuanto al factor "precipitaciones", en el presente análisis no fue posible incorporarlo ya que no existen registros pluviométricos puntuales para la zona y la información disponible no estaba en la escala de análisis con la que se trabajó. Sería necesaria la generación de registros históricos confiables de datos pluviométricos para esta zona, considerando que los movimientos en masa están íntimamente relacionados a la ocurrencia e intensidad de precipitaciones y ésta actúa como factor desencadenante.

Otros factores podrían incorporarse al modelo, tales como la red drenaje, y el cálculo de zonas buffer alrededor de los flujos de órdenes mayores al tercer grado, ya que se considera que pueden causar serios problemas de erosión y socavamiento (Bathrellos *et al*., 2009). En éste sentido, son muchas las variables que se podrían añadir al análisis en la búsqueda de generar un modelo de susceptibilidad altamente confiable. De todas maneras tal como se mencionó anteriormente no todos los factores aportan información de igual importancia, por lo que en futuras investigaciones se debería analizar si el incremento del número de variables en el modelo, mejora la calidad de la predicción.

Capítulo VI

Conclusiones

En este trabajo, se obtuvo el primer mapa de zonación de susceptibilidad por procesos de remoción para la cuenca del río Tartagal, Salta (Argentina), obtenido mediante técnicas de sensores remotos y SIG. Los datos revelaron que las zonas de baja susceptibilidad estuvieron representada por el 15.07 % del área de la cuenca, mientras que la susceptibilidad moderada ocupó el 22.45 % y la susceptibilidad alta registró una ocupación de la superficie del 62.48 %.

Se generaron mapas temáticos de factores condicionantes: litología, pendientes, curvatura y localización de movimientos en masa. Otros factores también fueron analizados, tal como la orientación de la pendiente y cobertura vegetal, pero los resultados obtenidos no validaron su inclusión en el modelo de susceptibilidad. Esto, no implica de ninguna manera, que carezcan o sean de menor importancia en la ocurrencia de los movimientos en masa. El método heurístico permitió relacionar entre sí los factores de manera confiable, y analizar como influye todo el conjunto de variables en la estabilidad de las laderas para la zonificación de la susceptibilidad del terreno. Sin embargo, en futuros estudios se deben considerar otros modelos como los determinísticos o estadísticos.

Con el objeto de dar validez al mapa de susceptibilidad obtenido, se compararon las áreas de alta susceptibilidad del mismo con un mapa de procesos de remoción en masa del evento del año 2006 ocurridos en la cuenca media sobretodo, obteniéndose una buena correspondencia (75.4 %), lo cual pone de manifiesto que el mapa de susceptibilidad puede ser usado como un modelo predictivo de la localización de futuros movimientos en masa.

La imagen multiespectral SPOT-4 de 10 m de resolución espacial post-evento 2009, resultó suficiente para identificar los procesos de remoción en masa y la clasificación automática basada

en la firma espectral del píxel, con asistencia del conocimiento experto, demostró ser un método útil para la identificación y mapeo, dado que permitió la localización rápida y eficiente de los mismos. De esta manera, permitió la elaboración de un mapa inventario que no solo hizo un aporte al entendimiento de la ocurrencia espacial de tales procesos en el área, sino que también resultó en una buena aproximación para evaluar la magnitud/intensidad del evento. En éste sentido, los datos revelaron que la superficie afectada y el volumen del material removido durante el alud del 2009, fueron aproximadamente de 3 km^2 y 2 km^3 respectivamente, mientras que la magnitud fue de 6.3 (de las 10 posibles, según la bibliografía).

Se propone que futuros estudios en la zona, utilicen imágenes ópticas de alta resolución espacial y se explore la utilidad de las imágenes de radar en el estudio temporal de la cobertura vegetal con datos de archivo. Asimismo, que se incluya la discriminación de las diferentes tipologías de movimientos y del material involucrado en un inventario multitemporal. De ésta manera, se aportará información sobre las modificaciones que se suceden en el tiempo, sobre el material removido durante un período (es decir, con varios eventos involucrados) y a partir de ello sería posible estimar la proporción promedio anual de movilización de material (φ_L), lo que contribuirá a un análisis cuantitativo del período, con estimaciones de la velocidad con la que se mueve el material en un tiempo y área determinados. Esto, sin dudas, mejorará las inferencias en términos de riesgo de desastres y hará posible previsiones más realistas.

Este trabajo de tesis hace un aporte significativo al entendimiento de la ocurrencia espacial de los procesos de remoción en masa y de las zonas del terreno más susceptibles a estos procesos en el área -inexistente hasta el momento-. Los datos ponen de manifiesto que más del 50% de la cuenca presenta alta susceptibilidad, concentrada en las partes alta y media de la misma (correspondientes a las Selvas montanas y Bosques montanos), lo que significa una alerta sobre las políticas que se tomen de ahora en más en cuanto a los desmontes, tala indiscriminada y demás usos del bosque nativo, teniendo en cuenta que las superficies boscosas cumplen un papel crucial en la fijación del suelo. Por ello, los resultados pueden ser utilizados como una herramienta de planeamiento, específicamente para la definición de zonas de usos de la tierra, para el diseño de proyectos de construcción y servirá como línea de base para futuros estudios que centren su mirada en la modelización hidráulica y de inundaciones; planificación de la

extracción maderera, entre otros. Asimismo, será útil en la implementación de estrategias de manejo del riesgo por parte de las autoridades.

Los numerosos eventos de procesos de remoción en masa ocurridos en el pasado en las Sierras Subandinas, que ocasionaron pérdidas (de vidas humanas e infraestructuras), la historia del uso del suelo a la que se ha visto sometida la cuenca (especialmente el feroz desmonte que generó la pérdida de algunos de los servicios ambientales que suministra el mismo) y los resultados cuantitativos que aquí se presentan, ponen de manifiesto la fragilidad ambiental de aquella zona del norte argentino. Por ello, se sugiere mayor investigación básica sobre la temática de la degradación de los bosques, especialmente para la determinación de parámetros medibles y para cuantificar su influencia en el ciclo hidrológico. Asimismo, la implementación de un sistema de alerta temprana, como un medio para recopilar y administrar información y así prevenir los efectos negativos de un posible nuevo evento de procesos de remoción en masa.

Finalmente, si bien los mapas de susceptibilidad constituyen una herramienta muy útil en la planificación del uso del suelo y gestión del riego, los mismos pueden ser insuficientes si no se consideran la magnitud (el área que ocupan y el daño que pueden causar) y la ocurrencia temporal (frecuencia) de los movimientos en masa. Por esto, se aconseja el análisis de estas variables, de manera de lograr el mapa de peligrosidad y riesgo para la zona a una escala regional.

Referencias

- Ahmad, R. and J. McCalpin, 1999. Landslide susceptibility maps for the Kingston Metropolitan area, Jamaica with notes on their use. UDS Publication N° 5, 25 p.
- Aleotti, P. and R. Chowdhury. 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. Bull. Eng. Geol: Environ., 58:21-44.
- Alonso, R. N., 2012. Riesgos geológicos en el Norte Argentino. Terremotos, volcanes, avalanchas, inundaciones, desertización y otros fenómenos naturales. 2° Ed. Mundo Gráfico Salta Ed. 252 pp. Salta.
- Anbalagan, R. 1992. Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain. Engineering Geology (32): 269-277.
- Anbalagan, R. and B. Singh. 1996. Landslide hazard and risk assessment mapping of mountainous terrains - a case study from Kumaun Himalaya, India. Engineering Geology Vol. 43 (4): 237-246.
- Ardizzone, F.; M. Cardinalli; M. Galli; F. Guzzetti and P. Reichenbach. 2007. Identification and mapping of recent rainfall-induced landslides using elevation data collected by airborne Lidar. Natural Hazards and Earth System Sciences 7:637-650.
- Baeza, C. y J. Corominas. 2001. Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques. Earth Surface Processes and Landforms, Balkema 26: 1251-1263.DOI: 10.1002/esp.263, Rotterdam.
- Barbeito, O.; M. Borsellino; J. D. Brea; E. Castellano; E. Castelló; H. D. Farías; G. Hillman; A. Rodríguez y G. Vanoli. 2009. Misión técnica de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación a la zona de Tartagal, Salta. Febrero de 2009.
- Barlow, J.; S. Franklin and Y. Martin. 2006. High spatial resolution satellite imagery, DEM derivates and image segmentation for the detection of mass wasting processes. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 72, 687-692.
- Barredo, J.I.; A. Benavidez; J. Hervhl and C. J. van Westen. 2000. Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria Island, Spain. International J. Appl. Earth Observ. Geoinform. 2 (1): 9–23.

- Bathrellos, G. D.; D. P. Kalivas and H. D. Skilodimou. 2009. GIS-based landslide susceptibility mapping models applied to natural and urban planning in Trikala, Central Greece. Estudios Geol. 65(1):49-65.
- Baumann, V.; R. Seggiaro; D. Azcurra and V. García. 2009. Inundación de detritos en la ciudad de Tartagal, provincia de Salta (Argentina). Instituto de Geología y recursos Minerales.
- Bonorino G.; F. Rivelli y M. Bartoloni. 2001. Hoja geológica 2363-I, Tartagal. Provincia de Salta. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino. Boletín 331p. Buenos Aires, Argentina. 30 pp.
- Borghuis, A. M.; K. Chang and H. Y. Lees. 2007. Comparison between automated and manual mapping of typhoon-trigged landslides from SPOT-5 imagery. International Journal of Remote Sensing. Vol. 28: 1843-1856.
- Brabb, E.; H. Pampeyan y M. G. 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.
- Brabb, E. 1984. Innovative approaches to landslide hazard Mapping: Proceedings 4th International Symposium on landslides. Toronto 1:307-324.
- Brardinoni, F.; O. Slaymaker and M. A. Hassan. 2003. Landslide inventory in a rugged forested watershed: a comparison between air-photo and field survey data. Geomorphology 54, 179–196.
- Brouver, M; E. Manghi; J. Menéndez; C. Montenegro; M. G. Parmuhi; J. Bono; M. V. Stamati y M. Strada. 2006. Cambios estructurales en la Selva Tucumano-Boliviana entre 1975 y 2000 en la zona de Tartagal. Dirección de Bosques. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. 15 pp.
- Brunsden, D. 1979. Mass movements En Embleton, C. E. y J. B. Thornes (Eds.), Progress in Geomorphology, Arnold.130.186.
- Bucknam, R.C.; J. A. Coe; M. M. Chavarria; J. W. Godt; A. C. Tarr; L. Bradley; S. Rafferty; D. Hancock; R. L. Dart and M. L. Johnson. 2001. Landslides triggered by Hurricane Mitch in Guatemala - Inventory and Discussion. U.S. Geological Survey Open File Report 01–443.

- Cabral, C. y G. Plaza. 2006. Diagnóstico y evaluación de la cuenca del río Tartagal y área de influencia. Municipalidad de Tartagal. Informe. 179 pp.
- Campbell, R.H., R. L. Bernknopf and D. R. Soller. 1998. Mapping time-dependent changes in soil slip-debris flow probability: U.S. Geological Survey Miscellaneous Investigations Series Map I-2586, scale 1:24,000.
- Campbell, A. C. 2009. Deriving a High Resolution DEM from ALOS-PRISM data. Dissertation towards the degree of Bachelor of Spatial Science. Faculty of Engineering and Surveying. 81 pp.
- Cardinali M; P. Reichenbach; F. Guzetti; F. Adrizzone; G. Antonini; M. Galli; M. Cacciano; M. Castellani and P. Salvati. 2001. A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risks in Umbria, Central Italy. Natural Hazards and Earth System Sciences 2:1-16.
- Cardinali, M.; M. Galli; F. Guzzetti; F. Ardizzone; P. Reichenbach and P. Bartoccini. 2006. Rainfall induced landslides in December 2004 in south-western Umbria, central Italy: types, extent, damage and risk assessment. Natural Hazards and Earth System Sciences 6: 237–260.
- Cardozo, C. P.; F. Bucci y A. Mondini. Inventario preliminar de deslizamientos y análisis de la estadística del tamaño en Tartagal, Norte de Argentina. En prensa.
- Carrara, A. and L. Merenda. 1976. Landslide inventory in northern Calabria, northern Italy. Geological Society of America Bulletin 87, 1153-1162.
- Carrara, A; M. Cardinalli and F. Guzetti. 1992. Uncertainty in assessing landslide hazard and risk. ITC Journal, 2: 172-183, Enshede 1992.
- Carrara, A; M. Cardinalli and F. Guzetti; F. Guzzetti and P. Reichenbach. 1995. GIS Technology in mapping landslide hazard. En: Carrara, A and F. Guzzetti (Eds.): Geographical Information Systems in assessing natural hazards. Kluwer Academic Publishers, Holanda. 335 pp.
- Carta Internacional del espacio y los grandes desastres. Disponible en: http://www.disasterscharter.org/web/charter/home). Fecha de visita 15/03/2013.
- Casson, B; C. Delacourt; D. Baratoux and P. Allemand. 2003. Seventeen years of the "La Clapiere" landslide evolution analyzed from ortho-rectified aerial photographs. Engineering Geology, 68: 123-139.

- Castellanos Abella, E. y C. van Westen. 2001. Landslide hazard assessment using the heuristic model. IV Taller Internacional de Ciencias de la Tierra y Medio Ambiente. La Habana, Cuba.
- Castellanos Abella, E. and C. van Westen. 2008. Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: A case study from San Antonio del Sur, Guantánamo, Cuba: Geomorphogy 94, 453-466.
- Cepal. 2011. Prevención y atención de los desastres naturales en las Américas y propuestas para el funcionamiento. Comisión económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Naciones Unidas. 20 pp.
- Chander, G.; B. L. Markham and D. Helder. 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+ and EO-1 ALI sensors. Remote Sensing of Environment 113: 893–903.
- Chander, G., and B. L. Markham. 2003. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures, and post-calibration dynamic ranges. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41: 2674−2677.
- Chung, C. and A. Fabbri. 2003. Validation of Spatial Prediction Models for Landslide Hazard Mapping. Natural Hazards 30: 451–472.
- Clerici, A.; S. Perego; C. Tellini; P. Vescovi. 2002. A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method. Geomorph 48 (4): 349-364.
- Coates, D.R. 1977. Landslides perspectives. In Coates, D. R. (Ed.), Landslides, Geological Society of America.
- Corominas, J.; R. Copons ; J. M. Villaplana; J. Altimir and J. Amigó. 2003. Integrated Landslide Susceptibility Analysis and Hazard Assessment in the Principality of Andorra. Natural Hazards 30: 421–435.
- Corsini, A.; L. Borgatti; F. Coren; and M. Vellico. 2007. Use of multitemporal airborne LiDAR surveys to analyze post- failure behavior of earth slides. Canadian Journal of Remote Sensing 33:116–120.
- Crozier, M. J. and T. Glade. 2005. Landslide Hazard and Risk: Issues, Concepts and Approach, in Landslide Hazard and Risk. Eds T. Glade, M. Anderson and M. J. Crozier. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, West Sussex, England. doi: 10.1002/9780470012659.ch1

- Cruden, D. and D. Varnes. 1996. Landslide types and processes. In: Turner, A..; Schuster, R. L. (Eds.). Landslides Investigation and Mitigation: Special Report, 247. Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington D. C. , 36-75 pp.
- Czuchlewski, K.R.; J. K. Weissel and Y. Kim. 2003. Polarimetric synthetic aperture radar study of the Tsaoling landslide generated by the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan. Journal of Geophysical Research 108 (F1), 7.1–7.11.
- Dai, F. C. and C. F. Lee. 2002. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. Geomorphology 42 (3-4): 213-228.
- Dai, F. C.; C. F. Lee and Y. Ngai. 2002. Landslide risk assessment and management: an overview. Engineering Geology 64, (1): 65-87.
- Dhakal, A. S.; T. Amada; M. Aniya. 2000. Landslide hazard mapping and its evaluation using GIS: an investigation of sampling schemes for a grid-cell based quantitative method. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 66, (8): 981-989.
- Dapporto, S.; P. Aleotti; N. Casagli and G. Polloni. 2005. Analysis of shallow failures triggered by the 14–16 November 2002 event in the Albaredo valley, Valtellina (Northern Italy). Advances in Geosciences 2:305–308.
- Daus, F. A. y R. García Gache. 1945. Geografía de la República Argentina: parte física. Buenos Aires. Ed. Estrada, 377 pp.
- Diario Página 12. Ley de Bosques, cinco años después. http://www.pagina12.com.ar/diario/sociedad/3-213079-2013-02-02.html. Fecha de visita: 21/05/2013.
- Dikau, R.; D. Brunsden; L. Schrott and M. Ibsen (Eds.). 1996. Landslide Recognition. Identification, movement and causes. Chichester, John Wiley & Sons Ltd.
- Donati, L. M. C. and Turrini. 2002. An objective method to rank the importance of the factors predisposing to landslides with the GIS methodology: application to an area of the Apennines (Valnerina; Perugia, Italy), Engineering Geology 63, 277-289.
- Drennon, C.B. y W. G. Schleining. 1975. Landslide Hazard mapping on a shoestring. En: P.A.S.C.E., J. Sur. and Mapping Div., SU1: 107 – 114.
- Epp, H., and L. Beaven. 1988. Mapping slope failure tracks with digital thematic mapper data. In IGARSS'88, Proceedings of the 1988 International Geosciences and Remote

- Sensing Symposium on Remote Sensing: Moving Towards the 21st Century, 13–16 Sept. 1988, Edinburgh, Scotland. IEEE, New York. Vol. 3: 1649–1652.
- EPOCH (European Community Programme). 1993. Temporal occurrence and forecasting of landslides In the European Community. Flageollet, J. C. (ed.), 3 volumes.
- Esper Angillieri, M. 2011. Inventario de procesos de remoción en masa de un sector del departamento Iglesia, San Juan. Rev. De la Asoc. Geológica Argentina 68 (2):225-232.
- European Commission, 2010. GMES data access specifications of the earth observation needs over the period 2011-2013. Data warehouse requirements, Version 1, Issue 3, 28 p.
- Felicísimo, A. M. 1994. Modelos Digitales del Terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales. Instituto de Recursos Naturales y Ordenación del Territorio, Universidad de Oviedo. Pentalfa ed. Oviedo, España. 219 pp.
- Fernándes, N. F.; C. P. Amaral, C. P. 1996. Movimentos de massa: uma abordagem geológicogeomorfológico. In: Guerra, A. J. T.; Cunha, S. B. (Ed.). Geomorfologia e meio ambiente. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil (3):123-194.
- Fernandes, N. F.; R. F. Guimarães; R. A. Gomes; B. Vieira; D. Montgomery and H. Greenberg. 2001. Condicionantes geomorfológicos dos escorregamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis. Revista Brasileira de Geomorfologia 2, (1): 51-71.
- Fernández, T.; J. Jiménez; P. Jiménez; R. El Hamdouni; F. J. Cardenal; J. Delgado; C. Irigaray y J. Chacón. 2008. Automatic Detection of landslide features with remote sensing techniques in the Betic Cordilleras (Granada, Southern Spain). The International Archivies of the Photogrammetry, Remote Sensing Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B8. Beijing.
- Fernández Bussy, J; M. Dall'Armellina; P. López. 2010. El riesgo de desastres en la planificación del territorio-primer avance. Ministerio de Planificación federal, Inversión Pública y Servicios. Programa Nacional de Prevención y reducción del riesgo de desastres y desarrollo territorial (PNUD-ARG 0/020). Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo, Argentina. 392 pp.
- Fiorucci, F.; M. Cardinali; R. Carla; M. Rossi; A. C. Mondini; L. Santurri; F. Ardizzone and F. Guzzetti. 2011. Seasonal landslide mapping and estimation of landslide mobilization rates using aerial and satellite images. Geomorphology. In press.

- Fundapaz. 2008. Territorios indígenas y bosques nativos en el Chaco salteño. Informe técnico. 115 pp.
- Gary, M.; R. McAfee y C. L. Wolf. 1972. Glossary of Geology. American Geological Institute. Eds.
- González Díaz, E. F. y E.C. Malagnino. 1986. El proceso de remoción en masa en la Sierra de Aguarague (Salta): Causas y factores determinantes del fenómeno del 29/3/1984 en el área abarcada por las cuencas en los arroyos Galarza, Lomitas y Gritón. Inédito.
- Google Earth –Pro. http://www.google.com/intl/it/earth/index.html
- Granica, K.; M. Hirschmugl; H. Proske; M. Schsdt; H. Wallner and M. Wurm. 2007. The derivation of indicators for landslide detection using very high resolution (VHR) satellite imagery. 9° International Symposium on High Mountain remote Sensing Cartography.
- Guhar-Sapir, D.; F. Vos; R. Below and S. Ponserre. 2011. Annual Disaster Statistical Review 2011. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED). Institute of Health and Society (IRSS). Université Catholique de Louvain. Brussels, Belgium. 52 pp.
- Gupta, R.P. and B. C. Joshi. 1990. Landslide hazard zonation using the GIS approach--A cases study from the Ramganga catchment, Himalayas. Engineering Geology (28):119-131.
- Guzzetti, F.; A. Carrara; M. Cardinalli; P. Raichenbach. 1999. Landslide hazards evaluation: a review of current techniques and their applications in a multi-scale study, Central Italy. Geomorphology 31:181-216.
- Guzetti, F.; M. Cardinalli, P. Reichenbach and A. Carrara. 2000. Comparing landslide maps: a case study in the upper Tiber River Basin, Central Italy. Environmental Management 25, 247-263.
- Guzzetti, F.; P. Reichenbach; M. Cardinalli; M. Galli; F. Ardizzone. 2005. Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. Geomorphology, 72:272-299.
- Guzzetti, F.; M. Galli; P. Reichenbach; F. Ardizzone; Cardinalli, M. 2006. Landslide hazard assessment in the Collazzone area, Umbria, Central Italy. Natural Hazards and Earth system Sciences, 6: 115-131.
- Guzzetti, F.; M. Manuta; F. Ardizzone; A. Pepe; M. Cardinalli; G. Zeni; P. Raichenbach and R. Lanari. 2009. Analysis of Ground deformation detected using the SBAS-DInSAR

- Technique in Umbria, Central Italy. Pure Appl. Geophysics. DOI 10.1007/s00024-009-0491-4.
- Guzzetti, F.; F. Ardizzone; M. Cardinalli; M. Galli; M. Rossi and D. Valigi. 2009. Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy. Earth and Planetary Science Letters 279: 222-229.
- Guzetti, F. 2009. Statics of landslide sizes to determine landslide mobilization rates and to ascertain landslide hazard and risk. International Conference in Commemoration of the 10th Anniversary of the 1990 Chi-Chi Earthquake, Taiwan.
- Guzetti, F.; A. C. Mondini; M. Cardinalli; F. Fiorucci; M. Santangelo and K. Chang. 2012. Landslide inventory maps: New tools for an old problem. Earth-Science Reviews 112:42-66.
- Hallegatte, S. and V. Przylusky. 2010. The economics of Natural Disasters. Concepts and Methods. Policy Research Working paper 5507. The World Bank. Sustainable Development Network. Office of the Chief Economist. 31 pp.
- Herrera, L.; M. Yirley y R. Martínez. 2011. Aplicación de métodos indirectos para el análisis de susceptibilidad de deslizamiento en la subcuenca del río Gatuncillo, Panamá. Rev. Mapping (1):15-23.
- Hiorokazu, T. 2003. Major Characteristics of Disaster risk and its Management strategies. *Paper Collection of Social Technology Research* (1): 141-148.
- Hutchinson. J. N. 1988. "General report morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to Geology and Hydrogeology. In Bonnard, C. (Ed.). Proceedings of the 5th lntemational Symposium on Landslides, A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands (1): 3-35.
- Iglesias, M. R.; A. Barchuk y M. P. Grilli. 2010. Seasonal and interannual dynamics of NDVI in arid forest of Argentina. Revista de Teledetección. 34: 44-54.
- INDEC 2001. Instituto Nacional de Estadísticas y Censo de la Republica Argentina.
- Jakob, M., 2005. Debris-flow hazard and analysis. En: Debris flow hazards and related phenomena. M. Jakob, M. and Hungr, O. (Ed.). Springer-Praxis books in geophysical sciences, p. 411-443, Chichester.

- Kääb, A. 2002. Monitoring high-mountain terrain from repeated air- and spaceborne optical data: examples using digital aerial and ASTER data. ISPRS Journal of Fotogrammetry and Remote Sensing 57:39-52.
- Kasai, M.; M. Ikeda; T. Asahina and K. Fujisawa. 2009. LiDAR-derived DEM evaluation of deep-seated landslides in a steep and rocky region of Japan. Geomorph.113: 57–69.
- Lan, H. X.; C. H. Zhou; L. J. Wang and R. H. Li. 2004. Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China", Engineering Geology (76):109-128.
- Lee, S. and D. G. Evangelista. 2008. Landslide Susceptibility Mapping using Probability and Statistics Models in Baguio City, Philippines. Department of Environment and Natural Resources, North Avenue, Diliman, Quezon City, Philippines. 12 pp.
- Liu, X.L.; Z. Q. Yue; L. G. Tham and C. F. Lee. 2004. Empirical assessment of debris flow risk on a regional scale in Yunnan province, southwestern China. Environmental Management 30:249-64.
- Lucini, P. 1973. The potential landslides forecasting of the "Argille Varicolori Scagliose" complex in IGM 174 IV SE Map, Savignano di Puglia (Compania). Geol. App. e Idrogeol. 8: 311-316.
- Magalhaes, T. L.; M. B. Schimalski; A. Mantovani and R.L.C. Bortoluzzi. 2012. Image Classification using Landsat TM Images to mapping wetlands vegetation (Banhados) of the Catarinense Plateau, Southern Brazil. Proceedings of the 4th GEOBIA, May 7-9, 2012 - Rio de Janeiro - Brazil. p.292.
- Mahdavifar, M.R.; S. Solaymani and M. K. Jafari. 2006. Landslides triggered by the Avaj, Iran earthquake of June 22, 2002. Engineering Geology 86: 166–182.
- Malamud, B. D.; D. L. Turcotte; F. Guzzetti, P. Raichenbach. 2004. Landslide inventories and their statistical properties. Earth Surface Process and Landforms 29,687-711.
- Mantovani, F.; R. Soeters and C. J. van Western. 1996. Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe. Geomorphology 15:213:225.
- Marcelino, E. . 2004. Mapeamento de Áreas Susceptíveis a escorregamento no Município de Caraguatatuba (SP) usando técnicas de Sensoriamento Remoto Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. INPE, Brasil. 230 pp.

- Marta, R. T.; N. Kerle; V. Jetten; C. J. van Western and K. V. Kumar. 2010. Characterising spectral, spatial and morphometric properties of landslides for semi-automatic detection using object-oriented methods. Geomorphology 116:24-36.
- McDermid, G. J. and S. E. Franklin. 1994. Spectral, spatial, and geomorphometric variables for the remote sensing of slope processes. Remote Sensing of Environment, v. 49, n.1): 57-71.
- McKean, J.; S. Buechel, S and L. Gaydos. 1991. Remote sensing and landslide hazard assessment. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 57, (9): 1185-1193.
- McKeana, J. and J. Roering. 2004. Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry. Geomorphology 57: 331–351.
- Miller, C.V. 1961. Photogeology. Mac Graw Hill Book Company Inc., London.
- Minetti, J. M. 2005. Características de la comercialización de maderas nativas en Orán y Tartagal (Salta). Disponible en : http://www.inta.gov.ar/yuto/info/documentos.pdf. Fecha de visita: 21/05/2013.
- Moine, M.; A. Puissant and J. P. Malet. 2009. Detection of landslides from aereal and satellite images with a semiautomatic method. Application to the Bacelonnette basin (Alps - de Haute-Provence, France). In: Landslide processes-from geomorphologic to dynamic modeling, Strasbourg: France. Disponible en: http://eost.u-strasbg.fr/omiv/Conference_Landslide_Processes_Chapter1.html. Fecha de visita: 10/06/2012.
- Moreiras, S. M. 2005. Landslide susceptibility zonation in the Río Mendoza Valley, Argentina. Geomorphology 66:345-357.
- Moreiras, S. M. 2009. Análisis Estadístico Probabilístico de las variables que condicionan la inestabilidad de las laderas en los valles de los río Las Cuevas y Mendoza. Revista de la Asociación Geológica Argentina 65(4): 780-790.
- Muschong, D. y R. Sarandón. 2007. Análisis de los cambios en la cobertura de la cuenca Trabunco -Quitrahue durante el periodo 1987-2001. Teledetección: Herramienta para la gestión sostenible, 1: 53-56. Ed: R. Rivas; A. Grisotto y M. Sacido. Ed. Martín.
- Muñiz, J. y V. M. Hernández. 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. 29:103-114.

- Nagarajan, R.; R. A. Mukherjee; A. Roy and M. V. Khire, M.V. 1998. Temporal remote sensing data and GIS application in landslide hazard zonation of part of Western ghat, India", International Journal of Remote Sensing (19):573-585.
- Nichol, J. and M. S. Wong. 2005. Detection and interpretation of landslides using satellite images. Land Degradation & Development 16, 243–255.
- Nishikawa, S. Total Disaster Risk management for sustainable Development. Proceedings of the International Conference on TDRM on 2-4 December 2003 in Kobe, Japan, 2003.
- Ochoa, M. y A. Lagos. 2010. Análisis comparativo de modelos heurístico y probabilístico para evaluar susceptibilidad a movimientos en masa en la cuenca alta del río Rímac. Sector Ticlio-Matucana, Lima Perú. XV Congreso Peruano de Geología.
- OFDA/CRED. 2006. EM-DAT International Disaster Database –www.em-dat.net. Universitè Catholique de Louvain, Brussels, Belgium.
- OIMT, 2002. Serie de políticas forestales N° 13. Directrices de la OIMT para la restauración, ordenación y rehabilitación de bosques tropicales secundarios y degradados". Disponible en:http://conserveonline.org/workspaces/FLR/reading/ps13s.pdf. Fecha de visita: 21/05/2013.
- Ono, M. 2009. Manual of PRISM DEM. Remote Sensing Technology Center of Japan. Version 4.1. 44 pp.
- Parise, M. 2001. Landslide mapping techniques and their use in the assessment of the landslide hazard. Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science 26, (9): 697-703.
- Penck, A. 1894. Morphologie der Erdoberfläche. Ed. Stuttgart, J. Engelhorn.
- Petley, D. 2010. Landslide fatality statistics for October 2010 . Disponible en: http://blogs.agu.org/landslideblog/2010/11/07/landslide-fatality-statistics-for-october 2010/. Fecha de Visita: 31/10/2012.
- Plan de Ordenamiento Territorial de las áreas boscosas de la Provincia de Salta. 2009. Informe Técnico. Secretaría de Medio Ambiente de la Provincia de Salta.
- Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas. 2007. Conozcamos los peligros geológicos en la región andina. Servicio Nacional de Geología y Minería. Publicación Geológica Multinacional, N°. 5. 78 p.

- Ray, R.G. 1960. Aerial Photographs in Geological Interpretation and Mapping. Geological Survey Professional Paper 373, Washington, USA.
- Rib, H.T. and T. Liang. 1978. Recognition and identification. In: Schuster, R.L., Krizek, R.J.(Eds.), Landslide Analysis and Control. Transportation Research Board Special Report 176. National Academy of Sciences, Washington D.C, pp. 34–80.
- Rodriguez, E.; C: S. Morris; J. E. Belz; E. C. Chapin; J. M. Martin; W. Daffer and S. Hensley. 2006. An assessment of the SRTM Topographic products. JPL report.
- Rossi, M.; F. Guzzetti; P. Reichenbach and S. Peruccacci. 2010. Optimal landslide susceptibility zonation based on multiple forecasts. Geomorphology 114: 129-142.
- Ruff, M.; K. Czurda. 2008. Landslide susceptibility analysis with a heuristic approach in the Eastern Alps (Vorarlberg, Austria). Geomorphology 94: 314-324.
- Saha, A.K.; R. P. Gupta, R.P.; I. Sarkar; M. K. Arora and E. Csaplovics. 2005. An approach for GIS-based Statistical Landslide Susceptibility Zonation--with a case Study in the Himalayas", Landslides (2): 61-69.
- Salvati P.; C. Bianchi; M. Rossi and F. Guzzetti. 2010. Societal landslide and flood risk in Italy. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 10:465–483.
- Sánchez L. G. 2008. Temporary evaluation of vegetation and estimation of soil loss in the river basin of Tartagal and catchment area. San Martín Department. Salta. National University of Salta. 163 pp.
- Santangelo, M.; M. Cardinali; M. Rossi and F. Guzzetti. 2010. Remote landslide mapping using laser rangefinder binocular and GPS. Natural Hazards and Earth System Sciences 10:2539–2546.
- Sauchyn, D. J. and N. R. Trench. 1978. Landsat applied to Landslide Mapping. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 44, (6): 735-741.
- Sayago, J. M. 1992. El Deterioro del ambiente en el Noroeste Argentino. En: Estudios Geográficos. Centro de Investigaciones sobre Economía, Sociedad y el medio (CIESM), Madrid. LIII 208.
- Schulz, W.H. 2007. Landslide susceptibility revealed by LIDAR imagery and historical records. Seattle, Washington: Engineering Geology 89:67–87.
- Segura, G.; E. Badilla y L. Obando. 2011. Susceptibilidad al deslizamiento en el Corredor Siquirres-Turrialba. Revista Geológica de América Central, 45:101-121.

- Seisdedos Santos, J. 2009. Los grandes paleo-desplazamientos de Güimar y la Oratava (Tenerife): análisis geológico, mecanismos de inestabilidad y modelización geomecánica. Tesis de Doctorado. Facultad De Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid. 202 pp.
- Sharpe, C.F.S. 1938. Landslides and related phenomena. Columbia University Press, N.Y.
- Singhroy, V.; K. E. Mattar and A. L. Gray. 1998. Landslide characterization in Canada using interferometric SAR and TM images. Advances in Space Research, 21: 465:476.
- Singhroy, V. and K. Molch. 2004. Characterizing and monitoring rockslides from SAR techniques. Advances in Space Research 33, 290–295.
- Skempton, A.W. and J. Hutchinson. 1969. Stability of Natural Slopes and Embankment Foundations. State of the Art Volume, International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City.
- Soriano Franquet, D. S. 2009. Identificación y análisis de corrientes de derrubios en el macizo de Montserrat mediante Google Earth y SIG. Tesina de Especialización. Universidad Politécnica de Cataluña, España. 205 pp.
- Suarez, A. M.; G. Peraldo; E. Badilla and L. Obando. 2009. Zonificación geomorfológica para la evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos en la Cuenca del río Viejo, Puriscal, Costa Rica. Rev. Geológica de América Central, 41:55-69.
- Terzaghi, K. 1950. Mechanism of landslides. In Paige, S. (Ed.). Applications of geology to Engineering Practice. Geological Society of America. New York: 83-123.
- Tobin, G. A. and B. E. Montz. 1997. Natural Hazards: explanation and integration. New York: The Guilford Publisher. 388 pp.
- UNESCO-WP/WLI. 1993. Multilingual Landslide Glossary. Bitech Publishers Ltd., Richmond, 34 pp.
- UNISDR. 2009. Terminología sobre Reducción del riesgo de desastres. Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres. Naciones Unidas. 38 pp.
- USGS. 2004. Landslides Types and Process. The U.S. Geological Survey Landslide Program. Fact Sheet 2004-3072. US Department of Interior Geological Survey. http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/.4 pp.

- Van Den Eeckhaut, M.; J. Poesen, G. Verstraeten, V. Vanacker; J. Nyssen; J. Moeyersons, L. P.H. Van Beek and L. Vandekerckhove. 2007. Use of LIDAR-derived images for mapping old landslides under forest. Earth Surface Processes and Landforms, 32:754-769.
- van Westen, C. J. 1993. GISSIZ-Geographic Information Systems in slope Instability Zonation. ITC Publication, 15, Vol. 1, Enshede 1993.
- van Westen, C. J.; N. Rengers; M. T. Terlien.; R. Soeters. 1997. Predicition of the occurrence of slope instability phenomena trough GIS-based hazard zonation. Geologische Rundschau 86, (2): 404-414.
- van Westen, C. J.; A. C. Seijmonsbergen and F. Mantovani. 1999. Comparing landslide hazard mapping. Natural Hazards 20, (2-3): 137-158.
- van Westen, C. J. and R. Soeters. 2000. Remote Sensing and Geographic Information Systems for Natural Disaster Management. En: Roy, P..; van Westen, C. J. and P. Champati Ray (Eds.): Natural Disasters and their mitigation. A Remote Sensing and GIS Perspective. Indian Institute of Remote Sensing. National Remote Sensing Agency, India: 31-76.
- van Westen, C. J. and F. L. Getahum. 2003. Analyzing the evolution of the Tessina landslide using aerial photographs and digital elevation models. Geomorphology 54:77-89.
- van Westen, C.J.; Soeters, R. and K. Sijmons. 2006. Digital geomorphological landslide hazard mapping of the Alpago area, Italy. JAG: International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 2, (1):51-60.
- van Westen, C. J.; E. Castellanos; S. L. Kuriakose. 2008. Spatial data for landslide susceptibility, hazard and vulnerability assessment: an overview. Engineering Geology, 102:112-131.
- van Zuidam, R.A. 1985. Aerial Photo-Interpretation in Terrain Analysis and Geomorphologic Mapping. ITC. Smits Publishers, The Hague, Netherlands.
- Varnes, D. J. 1958. Landslide types and processes, in Eckel, E. B., Ed., Landslides and engineering practice: Highway Research Board, Special Report 29.
- Varnes, D. J. 1978. Slope movements types and processes. In: Schuster, R. L. Krizek, R. L. (Eds.), Landslides: Analysis and Control. Special Report 176. Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington D. C. 11-33 pp.

- Varnes, D. J. 1984. IAEG Commission on Landslides and other mass movements. Landslide Hazard Zonation: a review of principles and Practice. The UNESCO Press. Paris. 63 pp.
- Vasantha Kumar, S.; N. Raja and G. Prasad Babu. 2007. Extraction of topographic and morphometric features for landslide zonation- a case of study Mettupalayam Highway. GIS Development, 9 pp.
- Volante, J. N.; A. R. Bianchi; H. Paoli; Y. Noé; H. Elena y C. Cabral. 2005. Análisis de la dinámica del uso del suelo agrícola del Noroeste Argentino medianteTeteledetección y Sistemas de Información Geográfica. Período 2000-2005. Proyecto de Relevamiento de Cultivos del NOA-PRO.RE:NOA. Estación Experimental Agropecuaria Salta. 70 pp.
- Záruba, Q. and V. Mencl. 1969. Landslides and their control: Nueva York, Elsevier y Academia de Ciencia de Checoslovaquia. 205 pp.
- Zhang J.; Z. Wanzhi; N. Okada and T. Hirokazu. 2004. Theories, Countermeasure and Approaches of Integrated Management on Natural Disaster Risk. *Journal of Basic Science and Engineering (supplement)*: 263－271.
- Zhang J.; N. Okada and H. Tatano. 2005. Integrated Management on Natural Disaster Risk. *Cities and Disaster Reduction*. 14 pp.
- Zinck, J. A.; J. López; G. I. Metternicht; D. P. Shrestha and L. Vásquez-Selem. 2001. Mapping and modeling mass movements and gullies in mountainous areas using remote sensing and GIS techniques. JAG: International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 3, (1): 43-53.

Apéndice

La recolección de puntos de control en el terreno (GCP), se realizó desde el 26 al 28 de abril de 2012 en la cuenca del Río Tartagal y en sus adyacencias. Los mismos fueron utilizados para la generación de un Modelo de Elevación Digital (DEM) de alta definición a partir de imágenes ALOS-PRISM provistas por CONAE.

Fueron colectados 14 puntos de control, usando un GPS Diferencial (DGPS) ASHTECH de frecuencia simple+Glonass. El mismo contó con una estación base (la cual se dejó en una zona de coordenadas conocidas, tomadas como referencia) y un rover (parte móvil del DGPS con la cual se tomaron los puntos en el terreno) (Figura 1).



Figura 1. Registro de uno de los puntos de control terreno (GCP) con el rover del DGPS.

Previa a la recolección de los GCP, fue necesario planificar la toma de los mismos, lo que permitió maximizar la eficiencia en el registro. Esto se realizó utilizando como imagen auxiliar, la escena Nadir de ALOS PRISM. Se planificaron registros en la cuenca alta, media y baja y en las adyacencias, con el objeto de tener una distribución uniforme y representativa del área de estudio. De acuerdo a Campbell (2009), un apropiado punto para la imagen ALOS PRISM es la intercesión de dos caminos, sin embargo en ésto no fue posible en todos los casos dadas las malas condiciones climáticas que se presentaron en los días de registro y las características de difícil accesibilidad del terreno, sobre todo en las cuencas media y alta.

Se aplicó el Método de Medición Simple Estático, con tiempo de ventana de 20 minutos en cada sitio, de manera que sea mayor el número de satélites intervinientes. Los registros se tomaron en el sistema de referencia World Geodetic System (WGS 84) y Coordenadas Geográficas Lat/Long.

El post-procesamiento fue completado por el Dr. C. Peralta de la Universidad Nacional de Salta-Fundación Capacitar del NOA; quien proveyó una lista con los GCP procesados, a partir de la cual se preparó un archivo shape, el cual fue exportado a ENVI 4.7 y ArcMap.

A continuación se presenta un mapa con la localización de los GCP registrados (Figura 2), caracterización de cada uno de los sitios y coordenadas xyz de cada punto relevado (Tabla 1).

Para el trabajo de campo, se contó con el apoyo de la Subsecretaria de Gestión Ambiental del Ministerio de Ambiente y Producción Sustentable de la Provincia de Salta que proveyó el GPS Diferencial; el apoyo logístico de la Fundación Capacitar del NOA, a través de su representante Dr. José Viramonte, que facilitó la camioneta para el viaje y CONAE, a través del Mtro. Félix Menicocci que suministró los aportes económicos para la ejecución de esta parte del proyecto.

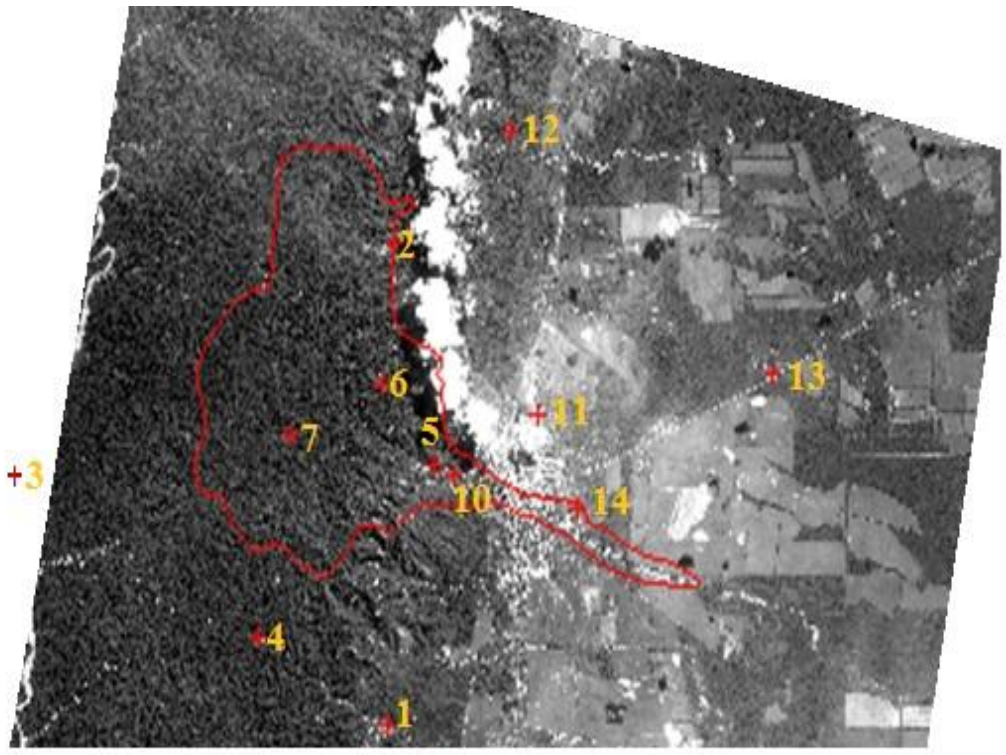


Figura 2. Localización de los GCP sobre imagen ALOS-PRISM, vista Nadir de fecha 27/04/2008.

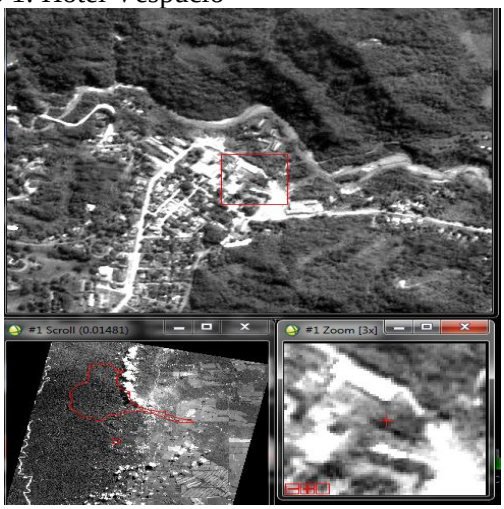
Tabla 1. Coordenadas xyz y breve descripción de cada punto relevado

ID	Código	Descripción	X	Y	Z
1	HOTE	Hotel Vespucio	22° 35' 2,30402" S	63° 51' 15,47892" W	569,20
2	ALTA	Cuenca Alta	22° 27' 16,78164" S	63° 51' 0,77537" W	1087,82
3	LAGU	Laguna sobre camino	22° 30' 58,83325" S	64° 00' 1,85944" W	555,12
4	CRUC	Cruce camino	22° 33' 36,17245" S	63° 54' 14,58932" W	680,72
5	MIRA	Mirador	22° 30' 53,30150" S	63° 50' 7,50209" W	587,23
6	DESI	Deslizamiento	22° 29' 33,44505" S	63° 51' 20,81830" W	749,98
7	AUAY	Planta El Aguay 1	22° 30' 21,77230" S	63° 53' 29,82040" W	654,54
8	AUA2	Planta El Aguay 2	22° 30' 22,03928" S	63° 53' 30,12469" W	654,30
9	AUA3	Planta El Aguay 3	22° 30' 21,14864" S	63° 53' 30,22692" W	653,22
10	PLAG	Planta Aguas del Norte	22° 31' 0,98192" S	63° 49' 37,27358" W	552,25
11	REFE	Punto Red Geodésica (A° Vicuña Muerta)	22° 30' 5,37030" S	63° 47' 38,08141" W	518,58
12	VIRG	Virgen de la Peña	22° 25' 28,10033" S	63° 48' 14,18714" W	580,58
13	RU86	Ruta 86	22° 29' 27,80584" S	63° 42' 5,48211" W	441,72
14	PLCL	Planta Líquidos Cloacales	22° 31' 34,24058" S	63° 46' 41,19481" W	494,16

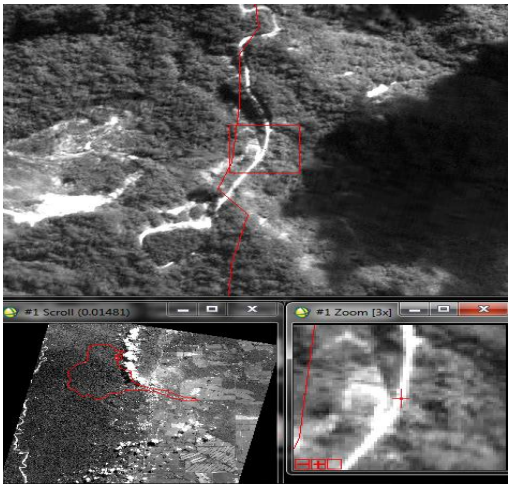
Caracterización de los sitios de registro

Punto 1: Hotel Vespucio

Sin foto



Punto 2: Alta Cuenca

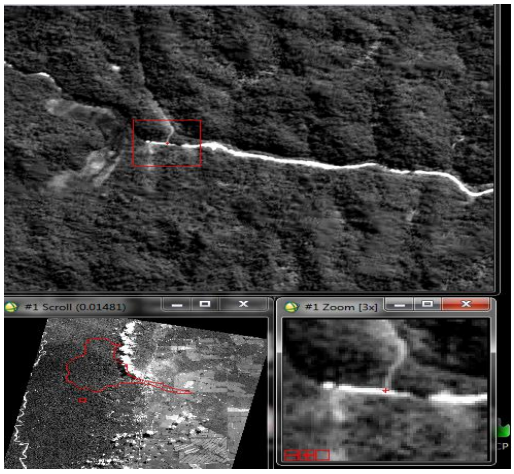




Punto 3: ----

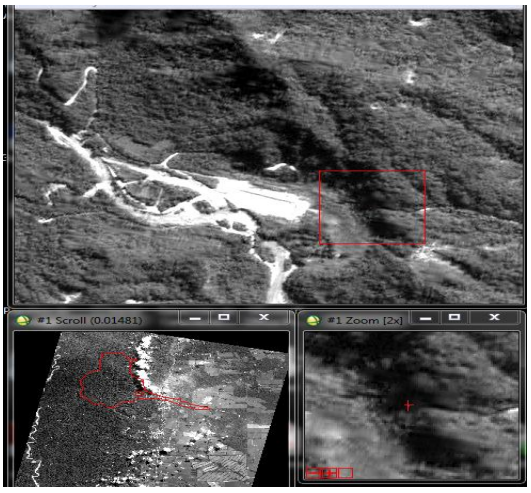
Descartado

Punto 4: Cruce de caminos



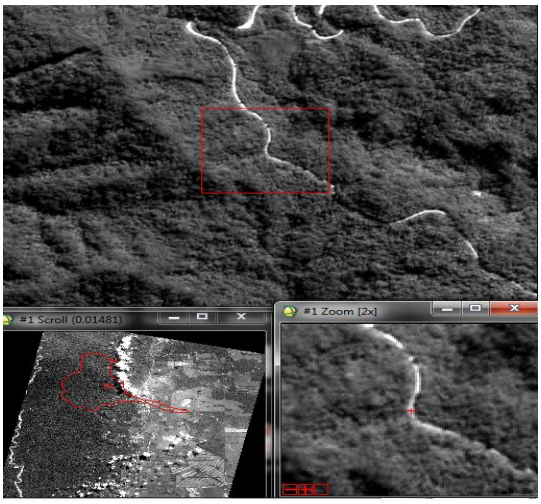


Punto 5: Mirador



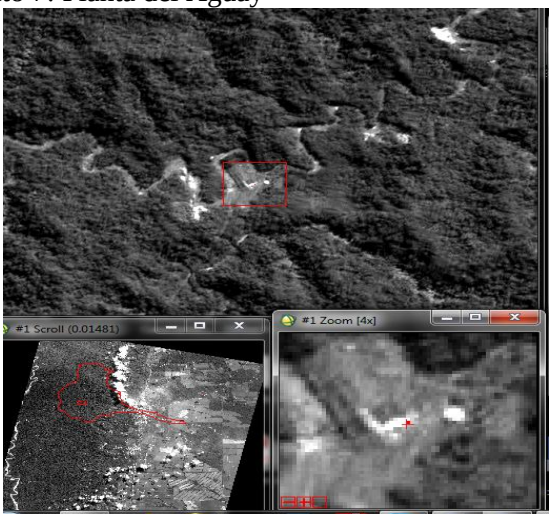


Punto 6



Sin foto

Punto 7: Planta del Aguay





Punto 8: ---

Descartado

Punto 9:---

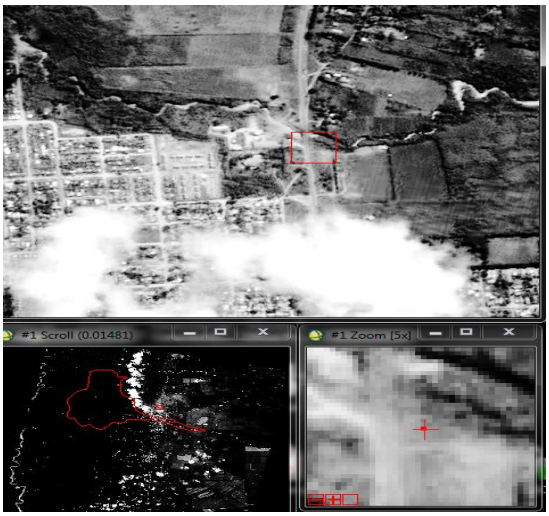
Descartado

Punto 10: Planta Aguas del Norte



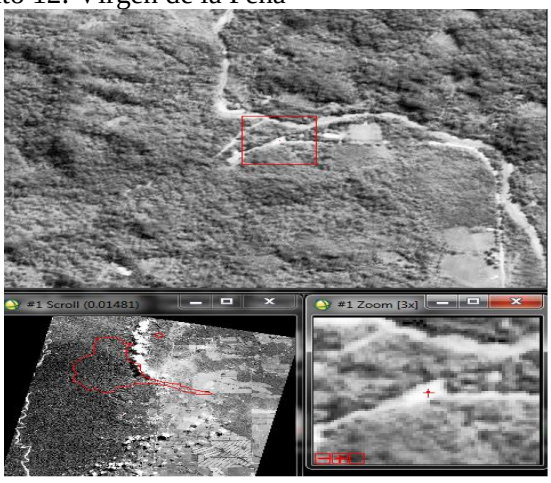


Punto 11: A° Vicuña muerta. Referencia IGM



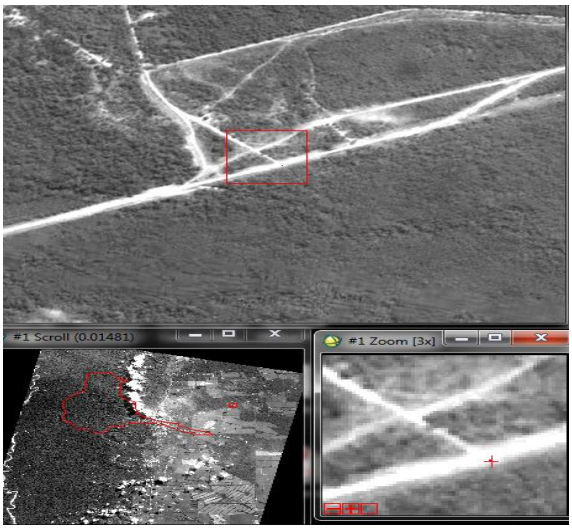


Punto 12: Virgen de la Peña





Punto 13: Ruta 86





Punto 14: Planta Líquidos cloacales





: Sitio de registro