



## ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD POR FLUJOS EN MASA EN LA PROVINCIA DE SAN JUAN (OESTE DE ARGENTINA)

### *Vulnerability analysis by mass flow in the San Juan province (West of Argentina)*

María Yanina Esper Angillieri

CONICET- Gabinete de Neotectónica y Geomorfología, INGENIO. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan. Av. José I. de la Roza y Meglioli. Rivadavia. 5400 San Juan. Argentina .  
yaninaesper@gmail.com

**Abstract:** The statistical index ( $W_i$ ) and logistic regression models are applied and verified for analysis of flows vulnerability in a portion of the Dry Frontal Andes and Occidental Preandes of Argentina, by means of Geographic Information System tools. For this purpose, thematic layers including debris flows inventory, lithology, elevation, slope, aspect, and solar radiation were used. Both models were useful to produce flows vulnerability maps where five categories have been distinguished: very low, low, moderate, high and very high. The analytical results show that elevations of 2000 m, a south-facing or south east-facing aspect, areas with relatively low solar radiation, and slope between 5° and 15° favor the existence of flows. Subsequently each flows vulnerability map was compared with known flows locations and tested. The statistical index ( $W_i$ ) model (accuracy is 82.65%) is better in prediction than logistic regression (accuracy is 75.64%) model for the high and very high categories.

**Keywords:** Vulnerability, Debris flows, GIS, Argentina.

**Resumen:** En este trabajo se aplican, mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica, dos modelos estadísticos para la evaluación de la vulnerabilidad del terreno a la ocurrencia de flujos en masa, el índice estadístico  $W_i$  y la regresión logística. El área de estudio comprende un sector de Cordillera Frontal y de Precordillera Occidental Argentina, donde se elaboraron mapas de elevación, pendiente, insolación, orientaciones, litologías y un inventario de flujos en masa. Los mapas de vulnerabilidad generados han sido reclasificados en cinco categorías: muy baja, baja, moderada, alta y muy alta. Los resultados indican que la aparición de flujos en masa está favorecida por zonas con elevaciones cercanas a los 2000 m, laderas orientadas hacia el este y sureste, de baja insolación y pendientes entre 5° y 15°. Finalmente, estos mapas, fueron validados espacialmente observándose que el modelo  $W_i$  (82,65%) es más adecuado en este caso que el modelo de regresión logística (75,64%) para las clases alta y muy alta.

**Palabras clave:** Vulnerabilidad, Flujos en masa, SIG, Argentina.

Esper Angillieri, M.Y. (2012): Análisis de la vulnerabilidad por flujos en masa en la provincia de San Juan (Oeste de Argentina). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 25 (3-4): 145-156.

Un flujo en masa se caracteriza por el desplazamiento relativamente rápido, bajo la influencia de la gravedad, de una masa desorganizada de rocas, detritos, materia orgánica y lodo pendiente abajo y con abundante cantidad de agua, lo que le otorga el comportamiento de un fluido viscoso, capaz de transportar grandes bloques de rocas, árboles e incluso viviendas con relativa facilidad (Cruden y

Varnes, 1996). Los flujos son procesos gravitacionales dominantes en los Andes y Pre Andes de Argentina y están principalmente relacionados con lluvias torrenciales, de corta duración y gran intensidad que causan pérdidas humanas y grandes daños en infraestructuras.

Ayala-Carcedo (2002) define la vulnerabilidad como la predisposición de una zona a ser afectada por flujos en

masa a través de un análisis comparativo de factores condicionantes y/o desencadenantes, con los terrenos o áreas afectadas, análisis que se materializa normalmente en forma de mapa de vulnerabilidad y suele presuponer que el comportamiento futuro del terreno seguirá las mismas pautas que hasta el presente. Es decir, los modelos de vulnerabilidad indican qué áreas poseen mayor o menor debilidad a sufrir flujos en masa, pero no nos informan sobre la probabilidad de ocurrencia en el tiempo de los mismos.

Los estudios de vulnerabilidad del terreno ante flujos en masa tiene como objeto delimitar áreas en una región que poseen una respuesta y una expectativa de daño similar ante un determinado proceso geológico que conlleva una peligrosidad, en base a características locales y propias del terreno, como geológicas, topográficas, geomorfológicas, etc. (Varnes, 1978; Brabb, 1984).

En este estudio, el análisis de la vulnerabilidad a la ocurrencia de flujos en masa se basa en la comparación entre el mapa inventario de flujos y los mapas de sus factores condicionantes seleccionados (estratigrafía, elevación, pendiente, orientación e insolación). Este análisis de vulnerabilidad a la ocurrencia de flujos será llevado cabo mediante la aplicación de dos métodos estadísticos, el índice  $W_i$  (bivariante) y la regresión logística (multivariante).

En varios trabajos previos, modelos como el  $W_i$  y la regresión logística han sido usados en el cálculo de la vulnerabilidad de procesos de movimientos en masa (Nandi y Shakkor, 2010; Bai *et al.*, 2010, 2011; Chauhan *et al.*, 2010; Das *et al.*, 2010; Ercanoglu y Temiz, 2011; Yalcin *et al.*, 2011), entre otros. Son mucho más escasos los trabajos relacionados con el estudio de la vulnerabilidad exclusiva por flujos en masa (Christenson, 1986; Jackson, 1987; Iovine *et al.*, 2003; Melelli y Taramelli, 2004; Wang *et al.*, 2006; Carrara *et al.*, 2008).

El objetivo de este trabajo es elaborar mapas de vulnerabilidad ante procesos de flujos en masa, al oeste de Argentina, mediante la aplicación de dos métodos estadísticos ( $W_i$  y la regresión logística). Esta área ha sido seleccionada debido a que es propensa a la ocurrencia de este tipo de eventos y si bien, estos eventos raramente han sido documentados, mediante entrevistas con habitantes locales se tiene conocimiento de eventos ocurridos durante 1913 y 1944 en las localidades Del Carrizal y Buena Esperanza (Esper Angillieri, 2007, 2012), en enero de 2007 en Angualasto, Buena Esperanza y Malimán y en 2010 en Malimán (Perucca y Esper Angillieri, 2011). Otros estudios relacionados con el sector bajo estudio y la temática propuesta son: Esper Angillieri (2009; 2010a; 2010b; 2011).

### Área de estudio

La provincia de San Juan se localiza en el centro oeste de la República Argentina. El sector de estudio abarca una superficie de 2175,9 km<sup>2</sup> y se emplaza en el noroeste de la provincia de San Juan, dentro de la jurisdicción del departamento Iglesia (Fig. 1). Posee una altitud mínima de 1587 m y máxima de 5639 m, con laderas muy abruptas con pendientes de hasta 45° y pobremente vegetadas (la vegetación dominante es la estepa arbustiva con cobertura general del

20 al 30%). Comprende las cuencas principales que incluyen a las localidades de Colangüil, Malimán, Angualasto y Buena Esperanza.

El área de estudio se caracteriza por un sistema de arroyos, en su mayoría intermitentes, con orientaciones predominantes este-oeste (Precordillera) y oeste-este (Cordillera Frontal). Estos arroyos experimentan episódicos incrementos de caudales, en la estación veraniega, que escurren rápidamente hacia el colector (Río Blanco) en forma de avenidas torrenciales que causan enormes perjuicios en la infraestructura vial e hidráulica.

Adosados al bloque montañoso de Cordillera Frontal y Precordillera se desarrollan distintos niveles de conos aluviales, conos coalescentes, bajadas, depósitos de agradación en pedimentos, terrazas adyacentes a los ríos y arroyos principales, depósitos de barreal y depósitos aluvionales actuales.

El clima es semiárido con veranos cortos e inviernos rigurosos de bajas temperaturas, fuertes vientos y tormentas estacionales que normalmente se producen de noviembre a marzo. El régimen anual de precipitaciones es irregular, con periodos de escasas precipitaciones a épocas de tormentas severas. La mayor tormenta registrada en un día tuvo lugar el 26 de diciembre de 1967, con una intensidad de 104 mm/h y 52 l/m<sup>2</sup> en un solo día. La precipitación media anual es de 44,9 l/m<sup>2</sup>, de los cuales el 80% corresponde a lluvias que acontecen entre diciembre-marzo, mientras que el 20% restante son precipitaciones que ocurren en el período abril-noviembre. La temperatura media anual es de 15,6°C. El mes más cálido es enero con 23°C y el más frío julio con 8°C. La humedad relativa media es de 42%.

### Geología

El área de estudio comprende dos unidades morfoestructurales a escala regional, la Precordillera Occidental (Rolleri y Baldi, 1969) y la Cordillera Frontal (Groeber, 1938). Ambas unidades son sistemas montañosos de orientación predominantemente N-S. En la Cordillera Frontal la unidad estratigráfica aflorante más antigua comprende depósitos de edad Carbonífero superior – Pérmico inferior, y están constituidos por grauvacas intercaladas con areniscas y conglomerados. Sobre estos se apoya, en discordancia angular, un complejo volcánico e ígneo de edad Pérmico – Triásico inferior. En algunos sectores estas rocas se presentan parcialmente cubiertas por sedimentos y rocas efusivas del Paleógeno-Neógeno.

Por su lado, la Precordillera Occidental se distingue por el excepcional desarrollo de los depósitos del Paleozoico inferior a medio y el limitado aporte magmático. Los depósitos neopaleozoicos, principalmente de origen marino (Carbonífero), se apoyan en franca discordancia angular sobre las unidades eopaleozoicas (Fig. 2).

La estructura de la zona se caracteriza por un cinturón de pliegues y cabalgamientos de tipo piel gruesa en la Cordillera Frontal y otra similar, pero de naturaleza epidérmica. Ambas estructuras fueron generadas como consecuencia de la actuación del ciclo de compresión durante el Mioceno. La vergencia general es oriental, con retrocabalgamientos

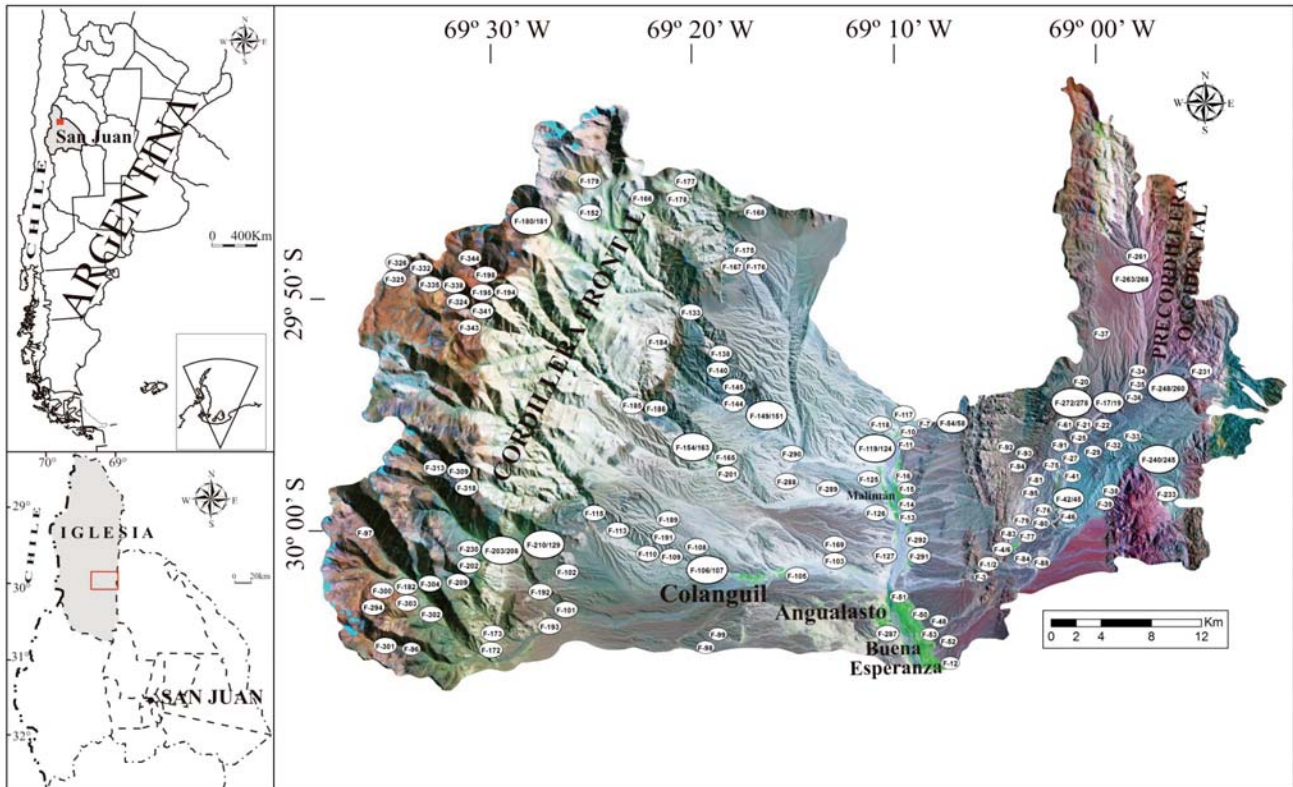


Fig. 1.- Ubicación del área de estudio e inventario de flujos de detritos.

importantes en los bordes occidentales de los principales cordones montañosos, con rumbo predominantemente N-S (Allmendinger *et al.*, 1990).

### Metodología

Se seleccionaron las variables que se considera pueden condicionar, en el área de estudio, en mayor medida la aparición de este tipo de procesos (elevación, pendiente, insolación, orientaciones y litología). Dichas variables, junto a los flujos en masa inventariados (Esper Angillieri, 2010, 2011), son la base a partir de la cual se generan los modelos de vulnerabilidad. El mapa de inventario de flujos ha sido preparado a partir de la interpretación de fotografías aéreas, imágenes satelitales y reconocimientos de campo. Una parte de la información se ha recogido mediante estudio y fotointerpretación de fotografías aéreas (escala 1:15.000), adquiridas a través de vuelos regionales realizados en los meses de otoño del periodo 1961-1963, facilitadas por la Secretaria de Minería Provincial. Han sido utilizadas las siguientes imágenes satelitales Landsat (MDA Federal, 2004): TM Mosaicos S-19-25 (25/01/1985 al 22/04/1990); TM Mosaicos S-19-30 (30/07/1986 al 13/04/1990) y ETM+ Mosaicos S-19-30 (03/12/1999 al 20/09/2002); ETM+ Mosaicos S-19-25 (05/02/2000 al 20/09/2002). Además han sido utilizadas las siguientes imágenes de gran resolución (Spot 5 y QuickBird): SPOT 5 (02/04/2008), color - 2,5m de resolución. ID: 56724100804021441472J (CNES, 2008). QuickBird (03/12/2005), color 2,44m ID: 1010010004AF1801; (02/09/2006), color 2,44m ID: 10100100052D9301;

(25/07/2002), color 2,44m ID: 1010010000DE8604 (Digital Globe, 2002).

En la elaboración del mapa litológico han sido utilizadas hojas geológicas del Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR) a escala 1:250.000 (Fig. 2).

El modelo digital de elevaciones (MDE) ha sido creado a partir de información topográfica obtenida de la misión topográfica Radar Shuttle (USGS, 2006) combinada con información obtenida de cartas topográficas a escala 1:50.000 y 1:100.000 del Instituto Geográfico Militar. En ambiente SIG, a partir del MDE, fueron calculados los mapas de pendiente, orientaciones de laderas e insolación. La herramienta de análisis de radiación solar calcula la insolación en  $WH/m^2$ , en base a un algoritmo de Fu y Rich (2002). El modelo final representa la insolación media de los meses de enero y febrero del año 2008, resultante de calcular la insolación media diaria (Fig. 2).

La relación espacial entre la ocurrencia de los flujos en masa y cada una de las clases de cada variable seleccionada ha sido analizada utilizando el índice  $W_i$  y la regresión logística.

El índice  $W_i$  de Van Westen (1997), es definido, mediante la Ecuación 1, como el logaritmo natural de la densidad de flujos de detritos para una clase sobre la densidad de flujos de detritos para el área total de estudio.

$$W_i = \ln \left( \frac{Densclas}{Densmap} \right) = \ln \left( \frac{N_{pix}(Si) / N_{pix}(Ni)}{\sum_{i=1}^n N_{pix}(Si) / \sum_{i=1}^n N_{pix}(Ni)} \right) \quad (1)$$

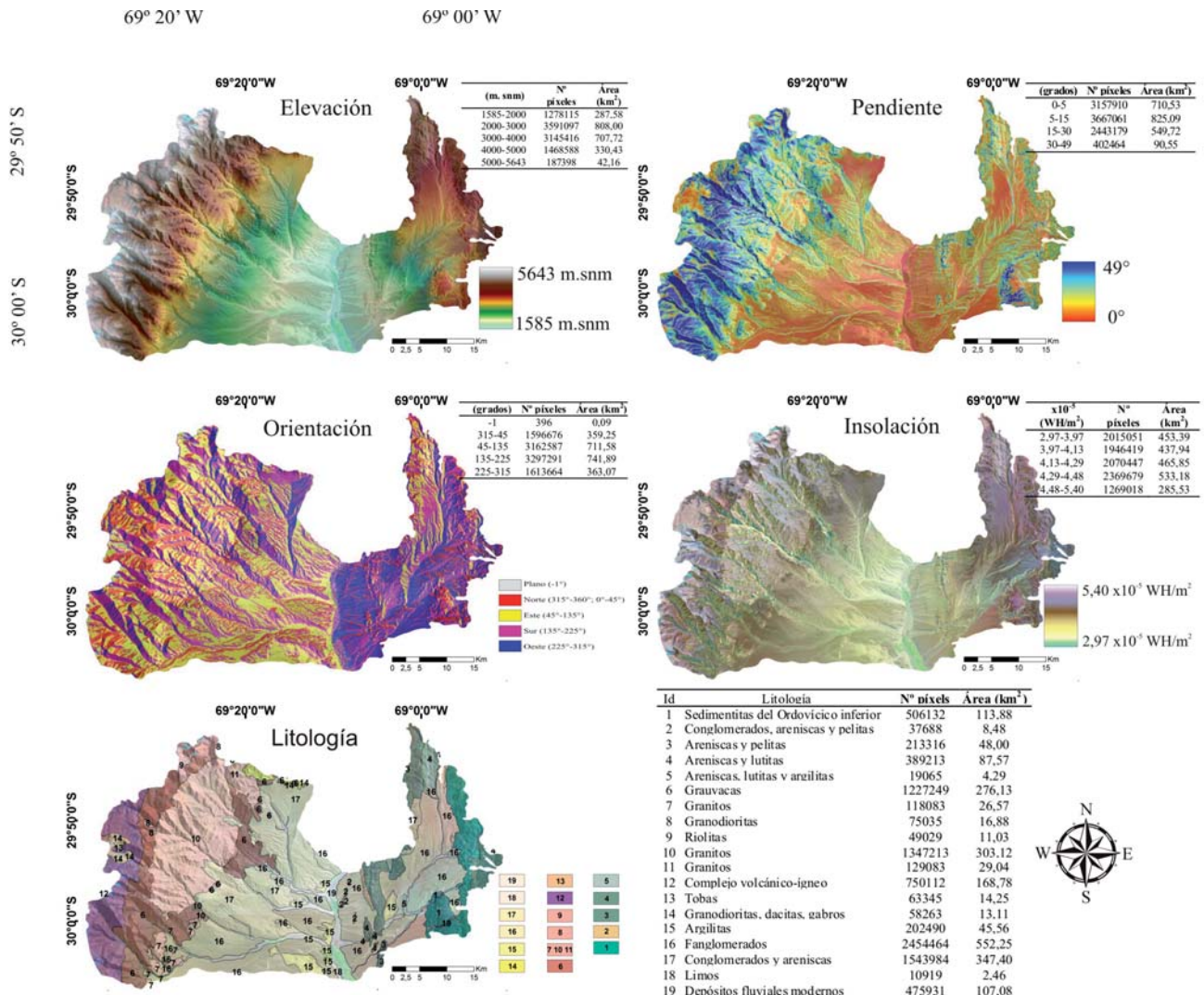


Fig. 2.- Mapas de variables y clases diferenciadas que controlan la ocurrencia de flujos en masa.

Donde:

- $W_i$  = el peso asignado a una variable específica
- Densclas = densidad de flujos para la clase de la variable considerada
- Densmap = densidad de flujos para el área de estudio
- $N_{pix}(S_i)$  = el número de píxeles que contienen flujos en la clase de la variable temática
- $N_{pix}(N_i)$  = el número de total píxeles dentro de la zona de estudio, para la clase de la variable considerada.

La regresión logística relaciona una serie de variables predictivas con la ocurrencia, o no, de flujos en masa y utiliza esta relación para la creación de un mapa de vulnerabilidad. La regresión logística establece una relación funcional entre la localización del proceso codificada de manera binaria, ocurrencia (1) o no de flujos en masa (0) y los diferentes factores que juegan un papel importante en la ocurrencia del proceso (Dai y Lee, 2002). Este método es útil para modelizar la vulnerabilidad de un evento ocurriendo como función de otros factores, porque la variable dependiente puede ser cualitativa, cuantitativa, o una combinación de ambas y no debe necesariamente presentar una

distribución normal. Para la aplicación de este método estadístico se obtuvo una muestra aleatoria de 2.000 puntos, representando 1000 la existencia de flujos y los otros 1000 su no aparición. Esto es debido a que es preferible que el número de puntos que represente la ocurrencia y la no ocurrencia sean idénticas (Süzen y Doyuran, 2004; Ayalew y Yamagishi, 2005; Nefeslioglu *et al.*, 2008). La variable litología fue tratada como categórica, mientras que el resto como variables continuas.

Además el Coeficiente de Correlación de Pearson fue utilizado para comprobar la correlación entre variables. El resultado numérico de esta correlación fluctúa entre los rangos de +1 a -1. Una correlación de +1 significa que existe una relación lineal directa perfecta (positiva) entre las dos variables. Es decir, las puntuaciones bajas de la primera variable (X) se asocian con las puntuaciones bajas de la segunda variable (Y), mientras las puntuaciones altas de X se asocian con los valores altos de la variable Y. Una correlación de -1 significa que existe una relación lineal inversa perfecta (negativa) entre las dos variables. Lo que significa que las puntuaciones bajas en X se asocian con los valores altos en Y, mientras las puntuaciones altas en X se asocian con los valores bajos en Y. Una correlación de 0 se inter-

preta como la no existencia de una relación lineal entre las dos variables estudiadas.

El índice de vulnerabilidad a la ocurrencia de flujos de detritos (ISFD), mediante la aplicación del método  $W_i$ , se obtuvo acorde a la Ecuación 2.

$$\text{ISFD} = \text{Litología}_r + \text{Elevación}_r + \text{Pendiente}_r + \text{Orientación}_r + \text{Insolación}_r \quad (2)$$

donde:  $\text{Litología}_r$  es el coeficiente  $W_i$  de la variable Litología;  $\text{Elevación}_r$  es el coeficiente  $W_i$  de la variable elevación;  $\text{Pendiente}_r$  es el coeficiente  $W_i$  de la variable pendiente;  $\text{Orientación}_r$  es el coeficiente  $W_i$  de la variable orientación e  $\text{Insolación}_r$  es el coeficiente  $W_i$  de la variable insolación.

Para la regresión logística se obtuvo la Ecuación 3.

$$z = \text{Litología}_b + (-0,0002 \times \text{Elevación}) + (0,001 \times \text{Orientación}) + (-0,087 \times \text{Pendiente}) + (-0,005 \times \text{Insolación}) + 2,333 \quad (3)$$

donde: Elevación es el coeficiente de la variable elevación; Pendiente es el coeficiente de la variable pendiente; Orientación es el coeficiente de la variable orientación; Insolación es el coeficiente de la variable insolación y  $\text{Litología}_b$  son los coeficientes de cada clase de la variable litología,  $z$  es el coeficiente de regresión.

Finalmente, los mapas de vulnerabilidad obtenidos fueron validados espacialmente mediante la superposición de dichos mapas con un mapa inventario de control y una población de flujos de detritos identificados e inventariados que no han sido utilizados en el cálculo inicial de los mapas de vulnerabilidad.

## Resultados y discusión

En ambiente SIG y formato grid, el área total de estudio posee 3271 filas y 5144 columnas que equivalen a un total de 9670614 píxeles (2175,9 km<sup>2</sup>), de los cuales 155058 píxeles (42,45km<sup>2</sup>) representan la aparición de flujos en masa y equivalen a un número de 346 flujos en masa identificados e inventariados (Fig.1 y Tabla 1). Para el análisis de vulnerabilidad se ha utilizado una población de 214 flujos en masa; el resto ha sido apartado arbitrariamente como grupo de control para la verificación espacial de los mapas de vulnerabilidad obtenidos. El porcentaje de aparición de flujos en masa para cada clase de cada variable considerada se muestra en la Tabla 2.

Los flujos en masa constituyen uno de los procesos de remoción en masa más ampliamente distribuidos en la región, rellenando valles y quebradas y en la superficie de los abanicos aluviales. En general se trata de depósitos de pocos metros de espesor, matriz sostén y mal seleccionados, predominan las partículas granulares (arenas, gravas, cantos y bloques). En cuanto la actividad de los flujos, de los 346 mapeados el 75,43% (261) son activos, el 22,83% (79) inactivos y el 1,73% (6) son fósiles.

La diferenciación entre los distintos estados de actividad de las geoformas inventariadas, puede ser discutible e imprecisa debido a que se logró, en la mayoría de los casos,

ID	Perímetro [m]	Área [km <sup>2</sup> ]	Latitud	Longitud
F-1/2	760,97	0,020	S 30 01 27,17	W 69 05 22,90
F-3	206,81	0,001	S 30 01 50,69	W 69 05 44,91
F-4/6	739,44	0,010	S 30 01 03,18	W 69 04 29,86
F-7	2251,25	0,090	S 29 55 21,76	W 69 08 31,17
F-8	492,03	0,010	S 29 55 52,62	W 69 09 05,92
F-9	169,06	0,001	S 29 55 49,49	W 69 09 03,63
F-10	862,63	0,010	S 29 55 46,31	W 69 09 02,21
F-11	1597,14	0,040	S 29 56 15,85	W 69 09 27,93
F-12	3891,42	0,200	S 30 05 42,63	W 69 07 16,32
F-13	1706,26	0,050	S 29 59 22,19	W 69 09 23,85
F-14	2323,29	0,060	S 29 58 51,38	W 69 09 25,60
F-15	2863,98	0,190	S 29 58 13,19	W 69 09 25,29
F-16	2363,61	0,180	S 29 57 46,08	W 69 09 31,40
F-17/19	9037,75	1,300	S 29 54 24,43	W 68 59 24,40
F-20	1942,16	0,110	S 29 53 47,11	W 69 00 47,88
F-21	3625,52	0,190	S 29 55 21,17	W 69 00 38,23
F-22	1416,40	0,120	S 29 55 26,80	W 69 00 10,08
F-23	1334,44	0,050	S 29 56 01,88	W 69 00 32,20
F-24	1753,40	0,060	S 29 55 51,06	W 69 00 10,43
F-25	2545,20	0,170	S 29 55 58,22	W 69 00 56,62
F-26	2703,32	0,160	S 29 56 27,18	W 69 01 10,67
F-27	4448,73	0,450	S 29 56 51,35	W 69 01 12,00
F-28	1168,45	0,050	S 29 56 46,23	W 69 00 28,29
F-29	1746,01	0,050	S 29 56 35,83	W 69 00 11,17
F-30	1528,78	0,050	S 29 56 22,62	W 68 59 24,04
F-31	800,85	0,020	S 29 56 18,42	W 68 59 42,02
F-32	1425,54	0,070	S 29 56 18,53	W 68 59 09,68
F-33	768,92	0,020	S 29 55 54,45	W 68 58 18,24
F-34	2521,08	0,240	S 29 53 21,40	W 68 57 59,61
F-35	5537,78	0,520	S 29 53 43,45	W 68 57 58,60
F-36	3543,13	0,200	S 29 54 14,00	W 68 58 19,85
F-37	1827,92	0,070	S 29 51 29,96	W 68 59 45,93
F-38	2210,36	0,130	S 29 58 20,92	W 68 59 20,25
F-39	1879,81	0,180	S 29 58 50,59	W 68 59 34,61
F-40	2087,27	0,100	S 29 57 19,56	W 69 01 18,36
F-41	3152,85	0,160	S 29 57 39,03	W 69 01 13,20
F-42/45	5800,36	0,390	S 29 58 42,46	W 69 01 35,03
F-46	6432,33	0,470	S 29 59 19,33	W 69 01 08,39
F-47	1626,39	0,030	S 30 00 36,49	W 69 04 00,31
F-48	1713,62	0,040	S 30 04 17,71	W 69 08 20,93
F-49	1727,44	0,040	S 30 03 55,81	W 69 08 37,09
F-50	2046,14	0,090	S 30 03 37,08	W 69 08 43,08
F-51	3183,79	0,150	S 30 02 51,53	W 69 09 48,86
F-52	11731,67	1,760	S 30 04 47,24	W 69 07 15,06
F-53	3503,78	0,350	S 30 04 28,98	W 69 08 06,03
F-54/58	2556,40	0,090	S 29 55 18,40	W 69 07 08,43
F-59	533,66	0,010	S 29 55 22,16	W 69 01 32,79
F-60	734,66	0,010	S 29 55 10,13	W 69 01 28,79
F-61	868,07	0,020	S 29 55 16,14	W 69 01 35,67
F-62	343,88	0,003	S 29 55 19,18	W 69 01 40,53
F-63	520,48	0,005	S 29 55 11,50	W 69 01 41,61
F-64	1016,52	0,020	S 29 55 30,48	W 69 01 42,82
F-65/66	1041,16	0,030	S 29 55 38,98	W 69 01 45,30
F-67	456,28	0,010	S 29 55 45,06	W 69 01 47,44
F-68	342,99	0,003	S 29 55 47,88	W 69 01 37,63
F-69	480,37	0,010	S 29 55 50,24	W 69 01 44,71
F-70	455,13	0,005	S 29 55 53,10	W 69 01 33,79
F-71	671,39	0,010	S 29 56 01,62	W 69 01 38,21
F-72	829,77	0,010	S 29 56 14,35	W 69 01 28,35

**Tabla 1.-** Inventario de flujos en masa, su superficie, perímetro y posición geográfica.

ID	Perímetro [m]	Área [km²]	Latitud	Longitud
F-73	1834,58	0,060	S 29 57 33,35	W 69 01 42,22
F-74	2254,07	0,070	S 29 56 59,23	W 69 01 47,64
F-75	2235,41	0,080	S 29 57 09,26	W 69 01 46,95
F-76	4831,25	0,230	S 29 59 13,33	W 69 02 38,86
F-77	3477,17	0,200	S 30 00 09,80	W 69 03 26,24
F-78	2320,51	0,080	S 29 59 41,78	W 69 03 33,66
F-79	4137,47	0,200	S 29 59 33,10	W 69 03 41,71
F-80	7658,36	1,070	S 29 59 40,73	W 69 02 52,44
F-81	2744,02	0,110	S 29 58 12,45	W 69 03 01,25
F-82	1440,37	0,050	S 29 58 35,95	W 69 02 48,56
F-83	2892,73	0,160	S 29 59 55,24	W 69 04 10,67
F-84	2363,98	0,160	S 30 01 12,41	W 69 03 40,68
F-85/87	1325,70	0,030	S 30 01 11,56	W 69 04 01,88
F-88	876,58	0,020	S 30 01 22,59	W 69 03 06,01
F-89	1925,76	0,070	S 29 56 44,79	W 69 01 33,73
F-90	2227,68	0,070	S 29 56 50,16	W 69 01 44,33
F-91	2433,66	0,100	S 29 56 34,52	W 69 01 28,45
F-92	1760,21	0,030	S 29 56 22,14	W 69 04 31,00
F-93	1243,70	0,020	S 29 56 40,23	W 69 03 59,04
F-94	3995,55	0,130	S 29 57 12,12	W 69 03 50,49
F-95	6618,82	0,210	S 29 58 07,16	W 69 03 17,20
F-96	467,29	0,010	S 30 05 03,15	W 69 34 03,03
F-97	4083,72	0,150	S 30 00 01,41	W 69 36 25,22
F-98	2862,51	0,150	S 30 05 00,68	W 69 19 26,30
F-99	2095,92	0,060	S 30 04 45,02	W 69 18 48,72
F-100	1560,86	0,040	S 30 04 24,87	W 69 18 45,50
F-101	2272,82	0,130	S 30 03 23,32	W 69 26 21,63
F-102	1824,59	0,080	S 30 01 42,86	W 69 26 18,35
F-103	3319,61	0,320	S 30 01 18,04	W 69 12 59,89
F-104	1002,56	0,030	S 30 01 54,86	W 69 14 30,87
F-105	1519,33	0,070	S 30 01 55,18	W 69 14 53,16
F-106/107	5199,35	0,390	S 30 01 42,43	W 69 19 13,06
F-108	3342,81	0,120	S 30 01 18,82	W 69 19 51,52
F-109	1720,94	0,070	S 30 01 03,45	W 69 21 09,46
F-110	2596,22	0,060	S 30 00 47,65	W 69 22 03,26
F-111	1642,98	0,030	S 30 00 53,20	W 69 22 22,42
F-112	1389,48	0,030	S 30 00 01,92	W 69 24 00,39
F-113	1914,79	0,060	S 29 59 57,12	W 69 23 45,95
F-114	881,69	0,010	S 29 58 59,60	W 69 25 15,31
F-115	852,31	0,010	S 29 59 11,08	W 69 24 56,54
F-116	649,71	0,010	S 29 59 52,19	W 69 23 57,25
F-117	5755,63	0,670	S 29 54 57,83	W 69 09 35,16
F-118	3929,34	0,500	S 29 55 23,82	W 69 10 09,76
F-119/124	18158,95	2,650	S 29 56 32,69	W 69 11 19,51
F-125	4038,97	0,260	S 29 57 45,69	W 69 11 21,37
F-126	2856,37	0,160	S 29 59 15,10	W 69 10 57,67
F-127	1720,61	0,100	S 30 01 04,34	W 69 10 29,99
F-128	883,80	0,010	S 30 00 59,22	W 69 04 21,63
F-129	381,49	0,010	S 30 01 19,04	W 69 04 43,54
F-130	306,42	0,004	S 30 01 20,28	W 69 04 58,00
F-131/132	863,11	0,020	S 30 01 23,23	W 69 05 06,75
F-133	1442,74	0,030	S 29 50 31,44	W 69 20 04,23
F-134	362,33	0,010	S 29 52 52,55	W 69 18 40,55
F-135	677,07	0,010	S 29 52 43,84	W 69 18 40,07
F-136	476,20	0,010	S 29 53 02,23	W 69 18 48,52
F-137	570,19	0,010	S 29 53 07,71	W 69 18 40,43
F-138	395,86	0,010	S 29 52 37,90	W 69 18 39,61
F-139	663,01	0,010	S 29 53 23,01	W 69 18 40,75
F-140	703,95	0,010	S 29 53 20,23	W 69 18 47,57

Tabla 1.- (Continuación) Inventario de flujos en masa, su superficie, perímetro y posición geográfica.

ID	Perímetro [m]	Área [km²]	Latitud	Longitud
F-141	1273,92	0,040	S 29 53 47,76	W 69 18 17,04
F-142	1225,45	0,050	S 29 54 05,99	W 69 18 16,49
F-143	1271,79	0,060	S 29 54 16,53	W 69 17 42,17
F-144	3527,64	0,260	S 29 54 30,97	W 69 17 59,75
F-145	2663,22	0,190	S 29 54 03,95	W 69 17 58,51
F-146	1461,18	0,040	S 29 54 50,75	W 69 16 56,48
F-147	1038,36	0,040	S 29 54 35,73	W 69 17 15,56
F-148	1022,23	0,040	S 29 54 27,88	W 69 17 24,88
F-149/151	2454,42	0,150	S 29 55 00,40	W 69 16 44,32
F-152	10836,26	0,560	S 29 46 13,94	W 69 25 07,57
F-153	1360,74	0,030	S 29 50 15,12	W 69 20 18,32
F-154/163	10720,30	0,470	S 29 56 20,40	W 69 19 58,67
F-164	1574,08	0,040	S 29 56 52,97	W 69 19 17,96
F-165	3421,67	0,100	S 29 56 48,95	W 69 18 59,29
F-166	4363,30	0,310	S 29 45 36,39	W 69 22 34,06
F-167	9105,56	0,760	S 29 48 34,47	W 69 18 12,58
F-168	16443,97	2,150	S 29 46 27,17	W 69 16 56,31
F-169	3319,61	0,320	S 30 01 18,04	W 69 12 59,89
F-170	2856,37	0,160	S 29 59 15,10	W 69 10 57,67
F-171	1720,61	0,100	S 30 01 04,34	W 69 10 29,99
F-172	4586,92	0,620	S 30 05 06,68	W 69 30 05,57
F-173	3119,44	0,210	S 30 04 40,82	W 69 30 00,96
F-174	512,62	0,010	S 29 47 30,69	W 69 17 33,23
F-175	1079,49	0,030	S 29 47 56,83	W 69 17 26,33
F-176	1023,40	0,010	S 29 48 16,66	W 69 17 23,99
F-177	2772,30	0,120	S 29 44 52,28	W 69 20 20,05
F-178	3883,64	0,100	S 29 45 43,11	W 69 20 37,69
F-179	6383,38	0,480	S 29 44 54,21	W 69 25 06,29
F-180/181	1951,81	0,040	S 29 46 33,15	W 69 28 00,56
F-182	2855,46	0,290	S 30 02 23,41	W 69 34 17,52
F-183	993,69	0,020	S 29 55 51,90	W 69 20 18,55
F-184	1008,12	0,060	S 29 51 49,51	W 69 21 44,45
F-185	2049,92	0,030	S 29 54 30,12	W 69 22 54,53
F-186	3395,89	0,080	S 29 54 42,24	W 69 21 55,08
F-187	2563,57	0,060	S 29 59 56,68	W 69 20 53,39
F-188	1967,00	0,040	S 29 59 25,72	W 69 21 36,52
F-189	3838,29	0,100	S 29 59 29,25	W 69 21 17,13
F-190	2432,29	0,060	S 29 59 56,18	W 69 21 33,64
F-191	4930,34	0,150	S 30 00 09,52	W 69 21 29,98
F-192	3014,16	0,120	S 30 02 34,26	W 69 27 48,51
F-193	2033,06	0,090	S 30 03 52,52	W 69 27 10,36
F-194	3366,14	0,050	S 29 49 38,55	W 69 29 16,81
F-195	1911,64	0,050	S 29 49 38,88	W 69 30 10,97
F-196	2071,34	0,030	S 29 49 21,56	W 69 29 49,62
F-197	911,80	0,020	S 29 49 36,50	W 69 29 54,53
F-198	5749,32	0,110	S 29 48 53,56	W 69 29 57,32
F-199	1851,94	0,020	S 29 50 44,26	W 69 30 12,59
F-200	2602,99	0,070	S 29 56 59,04	W 69 18 48,51
F-201	2479,01	0,080	S 29 57 09,64	W 69 18 19,90
F-202	5563,22	0,220	S 30 01 07,85	W 69 30 08,52
F-203/208	6498,24	1,070	S 30 00 46,72	W 69 29 22,78
F-209	1715,73	0,060	S 30 02 02,97	W 69 31 41,50
F-210/129	17897,88	2,490	S 30 00 33,61	W 69 27 32,53
F-230	6373,85	0,260	S 30 00 43,56	W 69 30 53,24
F-231	1815,77	0,050	S 29 53 09,20	W 68 54 58,86
F-232	1262,63	0,030	S 29 53 13,10	W 68 54 40,60
F-233	2276,25	0,070	S 29 58 24,22	W 68 56 36,43
F-234	927,49	0,020	S 29 57 43,52	W 68 56 30,73
F-235/238	1682,60	0,060	S 29 56 59,27	W 68 56 12,92

Tabla 1.- (Continuación) Inventario de flujos en masa, su superficie, perímetro y posición geográfica.

ID	Perímetro [m]	Área [km <sup>2</sup> ]	Latitud	Longitud
F-239	1650,93	0,080	S 29 56 37,10	W 68 56 51,63
F-240/245	6791,26	0,450	S 29 56 55,11	W 68 56 50,53
F-246	889,68	0,020	S 29 54 21,00	W 68 57 17,77
F-247	2935,47	0,170	S 29 54 04,92	W 68 58 05,70
F-248/260	9091,03	0,780	S 29 53 48,11	W 68 56 38,86
F-261	2747,10	0,160	S 29 48 08,48	W 68 57 58,59
F-262	829,89	0,020	S 29 47 51,27	W 68 58 05,43
F-263/268	2263,26	0,050	S 29 48 34,06	W 68 58 15,42
F-269	1206,44	0,030	S 29 53 40,83	W 69 00 36,20
F-270	2617,68	0,070	S 29 53 47,00	W 69 00 31,25
F-271	1685,35	0,070	S 29 54 16,40	W 69 00 39,18
F-272/278	9265,63	0,700	S 29 54 48,72	W 69 00 09,94
F-279	841,43	0,010	S 29 59 22,09	W 69 01 55,96
F-280/282	3334,01	0,100	S 29 57 51,41	W 69 01 45,16
F-283/286	2507,76	0,050	S 29 58 08,23	W 69 01 49,00
F-287	5495,40	0,190	S 30 04 27,10	W 69 10 30,59
F-288	39152,63	3,110	S 29 57 56,03	W 69 15 24,13
F-289	5184,03	0,590	S 29 58 08,58	W 69 13 19,87
F-290	5737,36	0,350	S 29 56 43,18	W 69 15 13,90
F-291	3362,70	0,250	S 30 00 55,93	W 69 08 48,59
F-292	4316,74	0,320	S 30 00 21,62	W 69 08 55,49
F-293	820,92	0,010	S 30 03 06,92	W 69 36 02,08
F-294	940,62	0,020	S 30 03 03,75	W 69 35 56,99
F-295	350,08	0,003	S 30 03 01,82	W 69 35 53,45
F-296	362,04	0,003	S 30 03 00,32	W 69 35 52,48
F-297	827,72	0,010	S 30 02 47,00	W 69 35 40,87
F-298	848,40	0,010	S 30 02 56,81	W 69 35 51,73
F-299	1002,32	0,010	S 30 02 51,81	W 69 35 49,05
F-300	6135,10	0,270	S 30 02 30,49	W 69 35 15,50
F-301	580,56	0,020	S 30 04 54,90	W 69 35 21,62
F-302	7311,27	1,400	S 30 03 33,34	W 69 33 10,28
F-303	3052,60	0,150	S 30 02 34,09	W 69 33 58,12
F-304	5302,78	0,110	S 30 01 50,19	W 69 33 40,72
F-305/308	1344,63	0,040	S 30 01 57,44	W 69 34 54,60
F-309	3789,73	0,130	S 29 57 03,90	W 69 31 40,39
F-310	1458,65	0,040	S 29 57 26,85	W 69 32 00,69
F-311	1249,45	0,040	S 29 57 21,24	W 69 32 07,96
F-312	769,41	0,020	S 29 57 16,65	W 69 32 19,58
F-313	1246,33	0,040	S 29 57 15,56	W 69 32 28,48
F-314	1366,75	0,020	S 29 57 35,58	W 69 31 39,59
F-315	1183,41	0,020	S 29 57 39,14	W 69 31 37,62
F-316	925,74	0,020	S 29 57 41,27	W 69 31 33,83
F-317	587,00	0,010	S 29 57 43,03	W 69 31 24,31
F-318	815,84	0,030	S 29 57 47,08	W 69 31 16,30
F-319	513,06	0,010	S 29 57 41,21	W 69 31 27,86
F-320	719,12	0,010	S 29 50 17,52	W 69 31 22,95
F-321	1042,70	0,020	S 29 50 20,82	W 69 31 21,99
F-322	738,81	0,010	S 29 50 15,80	W 69 31 10,66
F-323	570,14	0,010	S 29 49 54,14	W 69 31 33,76
F-324	851,62	0,030	S 29 49 58,28	W 69 31 28,52
F-325	749,39	0,010	S 29 49 03,52	W 69 34 45,86
F-326	521,04	0,010	S 29 48 39,89	W 69 34 33,38
F-327	463,10	0,010	S 29 48 40,24	W 69 34 43,41
F-328	413,43	0,004	S 29 48 43,37	W 69 34 47,59
F-329	456,49	0,010	S 29 48 39,04	W 69 34 37,72
F-330	396,78	0,010	S 29 48 36,49	W 69 34 30,37
F-331	526,15	0,010	S 29 48 28,06	W 69 33 52,38
F-332	903,53	0,020	S 29 48 35,86	W 69 33 28,27
F-333	859,92	0,020	S 29 48 42,31	W 69 33 15,91

**Tabla 1.** (Continuación) Inventario de flujos en masa, su superficie, perímetro y posición geográfica.

ID	Perímetro [m]	Área [km <sup>2</sup> ]	Latitud	Longitud
F-334	591,64	0,010	S 29 49 00,96	W 69 32 27,10
F-335	1376,93	0,020	S 29 49 17,71	W 69 32 22,77
F-336	1110,83	0,020	S 29 49 05,02	W 69 32 10,70
F-337	1154,57	0,020	S 29 49 14,47	W 69 32 00,33
F-338	1503,30	0,030	S 29 49 19,55	W 69 31 51,22
F-339	653,43	0,010	S 29 50 24,21	W 69 30 43,26
F-340	564,17	0,010	S 29 50 25,86	W 69 30 40,45
F-341	1042,44	0,020	S 29 50 32,11	W 69 30 51,46
F-342	1202,79	0,040	S 29 51 01,73	W 69 31 08,99
F-343	1138,81	0,050	S 29 51 11,17	W 69 31 05,56
F-344	677,93	0,020	S 29 48 22,08	W 69 31 03,48
F-345	1541,73	0,040	S 29 49 07,30	W 69 30 37,95
F-346	352,41	0,004	S 30 05 02,04	W 69 34 09,00

**Tabla 1.-** (Continuación) Inventario de flujos en masa, su superficie, perímetro y posición geográfica.

mediante fotointerpretación aplicando criterios geomorfológicos (Crozier, 1984) tales como presencia o ausencia de vegetación, diferenciación del tipo de vegetación entre el depósito y su entorno, depresiones rellenas o no, grado de erosión del depósito, grado de integración y modificación de la red de drenaje, existencia de bloques con superficies de fractura fresca o meteorizada, etc.

La correlación de Pearson (Tabla 3) muestra que las variables utilizadas presentan pobre correlación entre ellas, la mayor correlación encontrada es entre las variables Insolación y Altitud (0,780). Aunque un coeficiente de valor reducido no indica necesariamente que no exista correlación ya que las variables pueden presentar una relación no lineal, al realizar un análisis cualitativo se observa por ejemplo que al aumentar el valor de elevación no aumenta necesariamente la pendiente, ni que un determinado valor de orientación se asocie a una determinada litología.

Se han agrupado las distintas unidades litológicas que afloran en el área de estudio, en diecinueve clases (Fig. 2 y Tabla 2). El 44% de píxeles que señalan la aparición de flujos en masa se concentran en los afloramientos de edad Pleistocena (clase 16 y 17) que involucran el 40% del área total bajo estudio (Tabla 2). Es destacable que, dentro de ambas clases, tan sólo en el 8% y 9% de los píxeles que representan su superficie aflorante se ha descrito la existencia de flujos en masa (Fig. 3), por lo que la litología no parece constituir un factor especialmente significativo.

El mapa de elevaciones fue reclasificado en cinco clases (Fig. 2 y Tabla 2). Este mapa señala que las alturas en la zona de estudio oscilan entre 1585 m y 5643 m, la media es 3062 m y el modo 2956 m. El 72,44%, de los píxeles que indican aparición de flujos en masa, se agrupan en el intervalo de 1585 a 3000 m.snm (Tabla 2), en zonas localizadas por debajo de la altitud media del área de estudio. Analizando la Fig. 3 es posible observar que en casi el 50% de los píxeles que representan la clase 2 (2000-3000 m) se han descrito flujos en masa.

El mapa de pendientes fue reclasificado en cuatro clases (Fig. 2 y Tabla 2). Los resultados indican que, en el área de estudio, las pendientes oscilan entre 0° y 49° y que la mayor población de flujos en masa se concentra en pen-

dientes menores de 15° (Tabla 2). Tanto la clase 1 (0°) como la clase 2 (5-15°) poseen un elevado porcentaje de píxeles que involucran la existencia de flujos en masa, revelando que estos afectan principalmente zonas con inclinaciones muy leves o llanas (Fig. 3).

Las orientaciones varían desde -1° (plano) a 360° (norte), siendo la media de 156,6° y el modo de 135°. Este factor ha sido reclasificado en cinco clases (Fig. 2), indicando que los flujos en masa son más frecuentes en laderas orientadas al este (tipo 3, 30%) y al sur (tipo 4, 43%) (Tabla 2). Estas orientaciones son cercanas a la orientación media dominante de las laderas del área de estudio. A la vez, aproximadamente el 35% y 40% de los píxeles que representan laderas de tipo 3 y 4 han sido clasificados como píxeles con flujos en masa (Fig. 3).

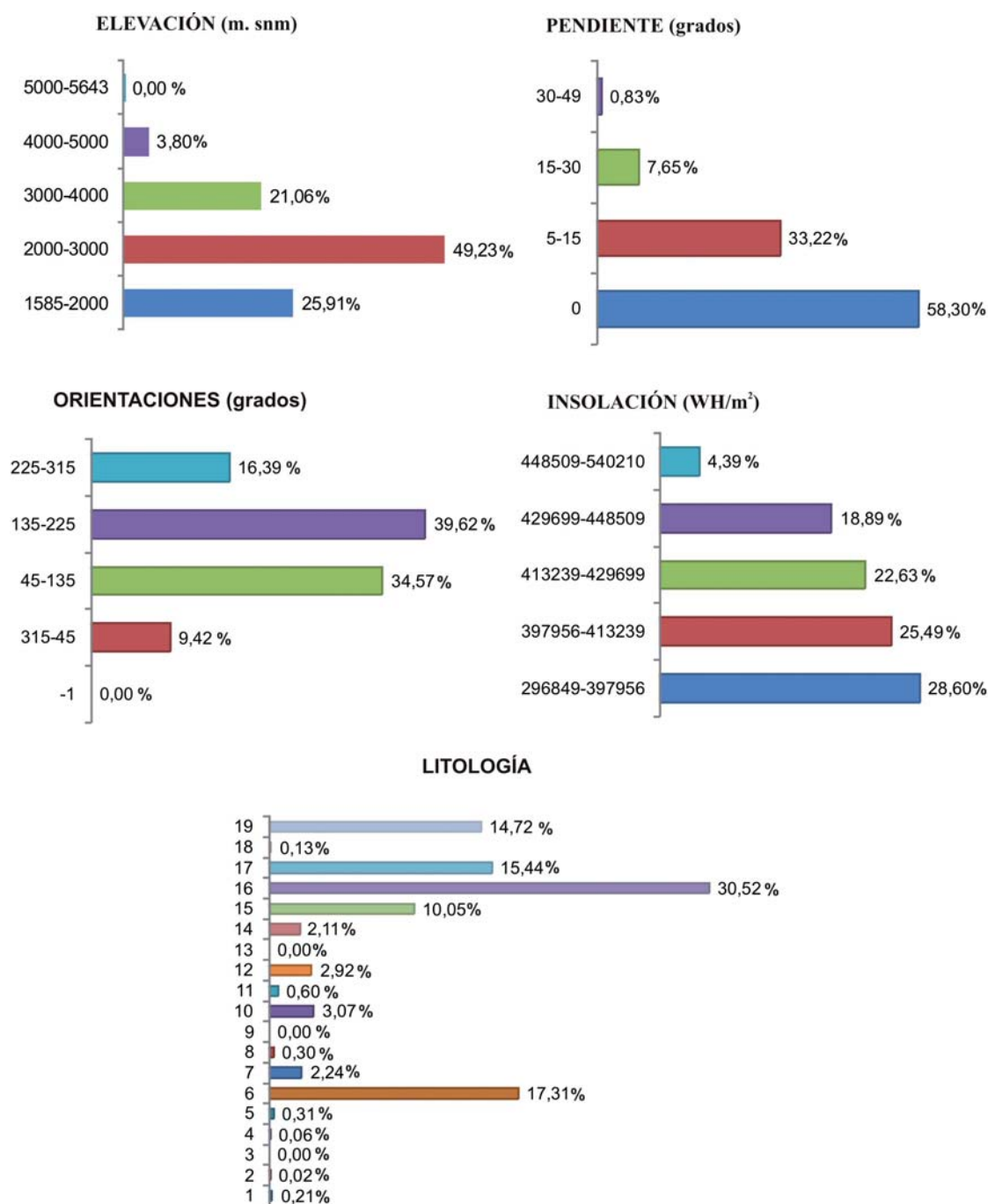
La insolación abarca valores desde  $2,97 \times 10^{-5}$  [WH/m<sup>2</sup>] a  $5,40 \times 10^{-5}$  [WH/m<sup>2</sup>]. La media es de  $1,34 \times 10^{-5}$  [WH/m<sup>2</sup>], es decir 134 (Fig. 2 y Tabla 2). Este factor parece no ser importante ni concluyente, aunque hay una leve diferencia a favor de las zonas con mayor insolación, los flujos en masa ocurren en todas las clases con similares porcentajes (Tabla 2).

Los coeficientes obtenidos a partir de la regresión logística (Tabla 2), señalan una correlación positiva entre la ocurrencia de flujos en masa y la variable orientación, mientras que para el resto de las variables continuas (elevación, pendiente e insolación) indican correlaciones negativas. En su aplicación, el sistema constructivo para las variables consideradas fue encontrado válido, con una predicción correcta del 70,4% de los píxeles (76,7% de los pí-

Factor	Clase	Nº de píxeles con FD	% de píxeles con FD	Píxeles totales	Píxel %	W <sub>i</sub>	Regresión logística
<b>Litología</b>	1	378	0.24	506132	5.234	-3,067	-1.977
	2	0	0.00	37688	0.390	0,000	-3.499
	3	0	0.00	213316	2.206	0,000	-22.109
	4	112	0.07	389213	4.025	-4,020	-21.246
	5	572	0.37	19065	0.197	0,627	-4.213
	6	31407	20.26	1227249	12.690	0,468	-0.215
	7	4150	2.68	118083	1.221	-0,950	0.036
	8	501	0.32	75035	0.776	0,785	0.479
	9	0	0.00	49029	0.507	-0,876	0.338
	10	3977	2.56	1347213	13.931	0,000	-20.064
	11	1099	0.71	129083	1.335	-1,692	-1.545
	12	4650	3.00	750112	7.757	-0,633	0.824
	13	0	0.00	63345	0.655	0,000	-0.411
	14	3909	2.52	58263	0.602	1,431	-20.584
	15	13260	8.55	202490	2.094	1,407	1.405
	16	51924	33.49	2454464	25.381	0,277	0.167
	17	17237	11.12	1543984	15.966	-0,362	-0.627
	18	242	0.16	10919	0.113	0,324	-1.156
	19	21640	13.96	475931	4.921	1,042	-0.824
<b>Altitud [m.snm]</b>	1585-2000	39543	25.50	1278115	13.216	0,657	-0.0002
	2000-3000	72790	46.94	3591097	37.134	0,234	
	3000-4000	36573	23.59	3145416	32.526	-0,321	
	4000-5000	6152	3.97	1468588	15.186	-1,342	
	5000-5643	0	0.00	187398	1.938	0,000	
<b>Pendiente (grados)</b>	0-5	87351	56.33	3157910	32.655	0,545	-0.087
	5-15	53350	34.41	3667061	37.920	-0,097	
	15-30	12949	8.35	2443179	25.264	-1,107	
	30-49	1408	0.91	402464	4.162	-1,522	
<b>Orientación (grados)</b>	-1	0	0.00	396	0.004	0,000	0.001
	315-45	16207	10.45	1613220	16.682	-0,467	
	45-135	46808	30.19	3162587	32.703	-0,080	
	135-225	67039	43.23	3297291	34.096	0,237	
	225-315	25004	16.13	1597120	16.515	-0,024	
<b>Insolación x10<sup>-5</sup> (WH/m<sup>2</sup>)</b>	2.97-3.97	43995.000	28.37	2015051	20.837	0,309	-0.005
	3.97-4.13	31192.000	20.12	1946419	20.127	-0,001	
	4.13-4.29	39799.000	25.67	2070447	21.410	0,181	
	4.29-4.48	32434.000	20.92	2369679	24.504	-0,158	
	4.48-5.40	7638.000	4.93	1269018	13.122	-0,980	

Tabla 2.- Coeficientes del índice W<sub>i</sub> y de la regresión logística para cada variable.





**Fig. 3.-** Frecuencia de aparición de flujos en masa para cada variable considerada, y sus tipos, en base al porcentaje de píxeles con flujos en masa.

xeles de aparición y 64,1% de no aparición). Además, su aplicación señala que la distribución espacial de los flujos en masa está controlada principalmente por la litología y la

	Litología	Elevación	Pendiente	Orientaciones	Insolación
Litología	1,000	-0,603	-0,584	0,105	-0,390
Elevación	-0,603	1,000	0,683	-0,152	0,780
Pendiente	-0,584	0,683	1,000	-0,133	0,197
Orientaciones	0,105	-0,152	-0,133	1,000	-0,167
Insolación	-0,390	0,780	0,197	-0,167	1,000

**Tabla 3.** Coeficientes de Correlación de Pearson de las variables que controlan la ocurrencia de flujos en masa en el área de estudio.

pendiente, evidenciado por el 82,1% y 75,7% de los píxeles correctamente clasificados, respectivamente.

De acuerdo con el mapa de vulnerabilidad obtenido a partir de la aplicación del modelo Wi (Fig. 4) el 8,49% del área total corresponde a zonas de muy baja vulnerabilidad. Las zonas de baja, moderada, alta y muy alta vulnerabilidad, presentan 24,97%, 26,24%, 35,14% y 4,14% del total de área, respectivamente (Fig. 4 y Tabla 4).

El mapa resultante de la aplicación de la regresión logística (Fig. 4), en comparación con el anterior, exhibe diferentes resultados ya que presenta mayores porcentajes para las zonas de muy baja vulnerabilidad (20,77%), bajos porcentajes para zonas de baja vulnerabilidad (7.30%) ,

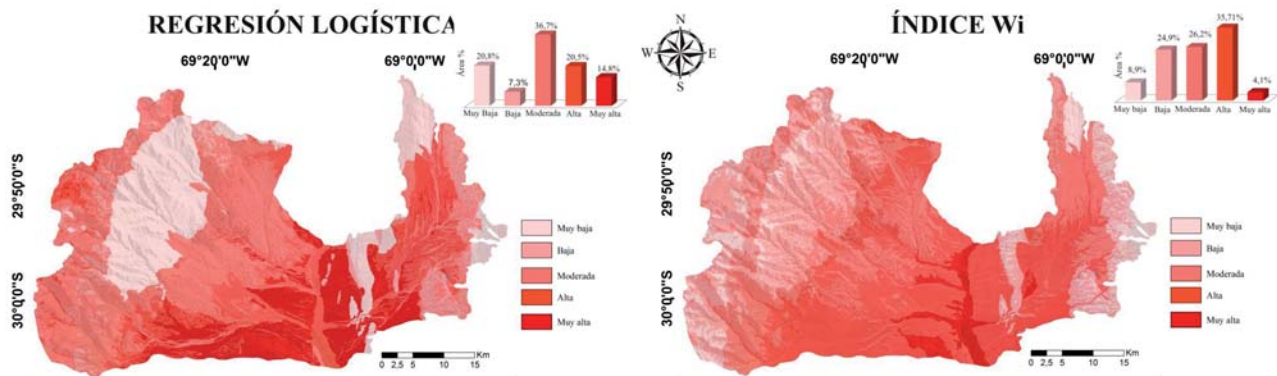


Fig. 4.- Mapas de Vulnerabilidad por flujos en masa elaborados a partir de los modelos  $W_i$  y de Regresión Logística.

mayor porcentaje para la clase moderada (36,69%), menor para la clase alta vulnerabilidad (20,49%) y más del triple para las zonas de muy alta vulnerabilidad (14,74%) (Fig. 4 y Tabla 4).

	$W_i$		Regresión logística	
	área (%)	% área flujo	área (%)	% área flujo
Muy baja	8,94	1,31	20,77	4,99
Baja	24,97	5,08	7,30	0,29
Moderada	26,24	10,96	36,69	19,07
Alta	35,71	56,90	20,49	53,41
Muy alta	4,14	25,75	14,76	22,23

Tabla 4.- Valores de verificación de los mapas de vulnerabilidad.

En resumen, de los resultados puede concluirse que las zonas más vulnerables a la ocurrencia de flujos en masa son aquellas de poca altitud (~2000msnm), con laderas orientadas hacia el sur-sureste, de baja inclinación o pendiente, preferentemente ubicados en las zonas deprimidas donde afloran depósitos cuaternarios y que reciben la menor insolación.

Los resultados obtenidos en la validación espacial de los mapas de vulnerabilidad a partir de la comparación entre estos y la población de puntos, que representan aparición de flujos en masa, seleccionados arbitrariamente y que no han sido utilizados en la confección de dichos mapas, se muestran en la Tabla 4. Como resultado, el mapa obtenido mediante el método  $W_i$  muestra mejor predicción (82,65%) para las clases de alta y muy alta vulnerabilidad, que el obtenido mediante regresión logística con el 75,64% de predicción.

El modelo resultante de la Regresión logística aunque predice un alto porcentaje de flujos en masa, sin embargo al observar el mapa resultante puede notarse que este clasifica a los sistemas de llanura de inundación y cauce actual, como de alta y no de muy alta vulnerabilidad, por tal motivo es preciso descartarlo.

La precisión de los mapas de vulnerabilidad elaborados está relacionada con la correcta identificación y mapeo de los flujos en masa, a la resolución espacial del modelo digital de elevaciones (90 m) y sus variables derivadas (pen-

diente, orientación e insolación). Estos mapas son útiles sólo a escalas regionales y no a escalas locales donde las heterogeneidades de geología y geografía prevalecen. Para que puedan ser aplicados a todo tipo de escalas es necesario que las variables digitales relacionadas con la ocurrencia de flujos en masa sean de mayor calidad. Sin embargo, la validez de estos modelos y mapas ha sido verificada el 23 de Enero de 2010 como consecuencia de las lluvias torrenciales que desencadenaron flujos en masa que afectaron la localidad de Malimán de Arriba provocando graves daños en las infraestructuras y pérdidas económicas. Este evento valida positivamente los mapas obtenidos ya que el área total afectada se localiza en las clases de alta y muy alta vulnerabilidad.

## Conclusiones

En este estudio se ha aplicado los métodos estadísticos  $W_i$  y regresión logística para generar mapas de vulnerabilidad a la ocurrencia de flujos de detritos. Han sido mapeadas 346 geoformas identificadas como flujos en masa, de ellas 214 fueron utilizadas en el cálculo de los mapas de vulnerabilidad, mientras que las 132 restantes fueron utilizadas en la validación de dichos mapas.

Los resultados de la validación espacial, muestran que el mapa obtenido mediante el método  $W_i$  ofrece una mejor predicción para las clases de alta y muy alta vulnerabilidad (82,65%) que el obtenido mediante regresión logística que muestra el 75,64% de predicción.

En un análisis rápido de los resultados puede concluirse que las zonas más vulnerables a la ocurrencia de flujos en masa son aquellas de poca altitud (~2000msnm), con laderas orientadas hacia el sur, de baja pendiente, donde afloran depósitos cuaternarios y que reciben la menor insolación.

Los mapas de vulnerabilidad por flujos en masa, como los aquí presentados, permitirían desarrollar protocolos de actuación en caso de desastre y resultan ser de gran utilidad para los ingenieros, al momento de diseñar medidas de contención y/o mitigación que ayuden a reducir pérdidas y a elegir posibles localizaciones para la construcción de nuevas infraestructuras.

## Bibliografía

- Allmendinger, R.W., Figueroa, D., Snyder, D., Beer, J., Mpodozis C. y Isacks, B.L. (1990): Foreland shortening and crustal balancing in the Andes at 30°S latitude. *Tectonics*, 9: 789-809.
- Atkinson, P.M. y Massari, R. (1998): Generalized linear modeling of susceptibility to landsliding in the central Apennines, Italy. *Computers and Geosciences*, 24: 373-385.
- Ayala-Carcedo, F.J. (2002): Una reflexión sobre los mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera, su naturaleza, funciones, problemática y límites. En: *Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas SIG. Fundamentos y Aplicaciones en España*, (Ayala-Carcedo F.J. y Corominas J., eds.). Instituto Geológico y Minero de España. 7-20.
- Ayalew, L. y Yamagishi, H. (2005): The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65: 15-31.
- Bai, S.B., Wang, J., Lü, G.N., Zhou, P.G., Hou, S.S. y Xu, S.N. (2010): GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping of the Zhongxian segment in the Three Gorges area, China. *Geomorphology*, 115: 23-31.
- Bai, S.B., Wang, J., Zhou, P.G. y Ding, L. (2011): GIS-based rare events logistic regression for landslide-susceptibility mapping of Lianyungang, China. *Environmental Earth Sciences*, 62: 139-149.
- Brabb, E.E. (1984): Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping. En: *Fourth International Symposium on Landslides, Volumen I*. Toronto, Canada. Canadian Geotechnical Society, 307-324.
- Carrara, A., Crosta, G. y Frattini, P. (2008): Comparing models of debris-flow susceptibility in the alpine environment. *Geomorphology*, 94: 353-378.
- Chauhan, S., Sharma, M. y Arora, M.K. (2010): Landslide susceptibility zonation of the Chamoli region, Garhwal Himalayas, using logistic regression model. *Landslides*, 7: 411-423.
- Christenson, G.E. (1986): Debris-flow mapping and hazards assessment in Utah. En: *Improving the effectiveness of floodplain management in arid and semi-arid regions, Proceedings*, (J. Kusler y G. Brooks, Eds.). Association of State Floodplain Managers, Inc., 74-77.
- CNES (Centro Nacional de Estudios Espaciales francés). (2008): ID: 56724100804021441472J.
- Crozier, M.J. (1984): Field assessment of slope instability, En: *Slope Instability*. (D. Brunnsden and D.B. Prior, Eds.), Chichester, John Wiley & Sons Ltd. 103-142.
- Cruden, D.M. y Varnes, D.J. (1996): Landslide types and processes. En: *Landslides. Investigation and Mitigation. Transportation Research Board, Special Report 247*, (A.A.K. Turner y R.L. Schuster, eds.). 47. National Academy Press, Washington D.C., 36- 75.
- Dai, F.C. y Lee, C.F. (2002): Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 42: 213-238.
- Das, I., Sahoo, S., Van Westen, C., Stein, A. y Hack, R. (2010): Landslide susceptibility assessment using logistic regression and its comparison with a rock mass classification system, along a road section in the northern Himalayas (India). *Geomorphology*, 114: 627-637.
- Digital Globe. (2002): Imágenes QuickBird, ID: 1010010004 AF1801, ID: 10100100052D9301, ID: 1010010000DE8604.
- Ercanoglu, M. y Temiz, F.A. (2011): Application of logistic regression and fuzzy operators to landslide susceptibility assessment in Azdavay (Kastamonu, Turkey). *Environmental Earth Sciences*, En Prensa.
- Esper Angillieri, M.Y. (2007): El aluvión del 13 de febrero de 1944 en la Quebrada del Carrizal, Departamento Iglesia, Provincia de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 62: 283 - 288.
- Esper Angillieri, M.Y. (2009): A preliminary inventory of Rock glaciers at 30°S latitude. Cordillera Frontal of San Juan, Argentina. *Quaternary International*, 195: 151 - 157.
- Esper Angillieri, M.Y. (2010a): Application of frequency ratio and logistic regression to active rock glacier occurrence in the Andes of San Juan, Argentina. *Geomorphology*, 114: 396-405.
- Esper Angillieri, M.Y. (2010b): *Peligros Geológicos Asociados a Procesos de Remoción en Masa e Inundaciones con Características Destructivas. Área de Amortiguación del Parque Nacional San Guillermo. Provincia de San Juan (San Juan, Argentina)*. Tesis doctoral, Universidad Nacional de San Juan, 235 p.
- Esper Angillieri, M. Y. (2011): Inventario de Procesos de Remoción en masa en un sector del Departamento Iglesia, San Juan, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 68: 225-232.
- Esper Angillieri, M. Y. (2012): Morphometric characterization of the Carrizal basin applied to the evaluation of flash floods hazard, San Juan, Argentina. *Quaternary International*, 253: 74-79.
- Fu, P. y Rich, P.M. (2002): A geometric solar radiation model with applications in agriculture and forestry. *Computers and Electronics in Agriculture*, 37:25-35.
- Groeber, P. (1938): *Mineralogía y geología*. Buenos Aires, Espasa-Calpe, 492 p.
- Jackson, L.E., Jr. (1987): Debris flow hazard in the Canadian Rocky Mountains. *Geological Survey of Canada Paper*, 86: 20 p.
- Iovine, G., Di Gregorio, S. y Lupiano, V. (2003): Debris-flow susceptibility assessment through cellular automata modelling: an example from 15-16 December 1999 disaster at Cervinara and San Martino Valle Caudina (Campania, southern Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3: 457-468.
- MDA Federal. (2004): Landsat GeoCover ETM+ 2000 and 1990/TM Edition Mosaics Tile S-19- 30.ETM-EarthSat-MrSID and S-19-25.ETM-EarthSat-MrSID, 1.0, USGS, Sioux Falls, South Dakota, 2000.
- Melelli, L. y Taramelli, A. (2004): An example of debris-flows hazard modeling using GIS. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4: 347-358.
- Nandi, A. y Shakoor, A. (2010): A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses. *Engineering Geology*, 110: 11-20.
- Nefeslioglu, H.A., Duman, T.Y. y Durmaz, S. (2008): Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Eastern Black Sea region of Turkey). *Geomorphology*, 94: 410-418.
- Perucca, L. P. y Esper Angillieri, M. Y. (2011): Morphometric characterization of the Molle Basin applied to the evaluation of flash floods hazard, Iglesia Department, San Juan, Argentina. *Quaternary International*, 233: 81-86.
- Rolleri, E. y Baldi, B. (1969): Paleogeography and distribution of Carboniferous deposits in the Precordillera, Argentina En: *Coloquio de la I.U.G.S., La estratigrafía de Gondwana, Ciencias de la Tierra 2*. Paris, Francia, UNESCO, 1005 - 1024.
- Süzen, M.L. y Doyuran, V. (2004): Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using Geographical Information Sys-

- tems: a method and application to Asarsuyu catchment, Turkey. *Engineering Geology*, 71: 303–321.
- USGS. (United States Geological Survey). (2006): Shuttle Radar Topography Mission, 3 Arc Second scene SRTM\_u03\_p232r081, SRTM\_u03\_p233r080 and SRTM\_u03\_p233r081, Unfilled Finished 2.0, Global Land Cover Facility, University of Maryland, College Park: Maryland, February 2000.
- Van Den Eeckhaut, M., Vanwalleghem, T., Poesen, J., Govers, G., Verstraeten, G. y Vanderkerckhove, L. (2006): Prediction of landslide susceptibility using rare events logistic regression: a case-study in Flemish Ardennes (Belgium). *Geomorphology*, 76: 392–410.
- Van Westen, C.J. (1997): Statistical landslide hazard analysis. ILWIS 2.1 for Windows application guide. ITC Publication, Enschede, 73–84.
- Varnes, D.J. (1978): Slope movement types and processes. En: *Landslides: Analysis and Control. Transportation Research Board Special Report 176*, (R.L. Schuster y R.L. Krizek, eds.). National Academy of Sciences, Washington, 11–33.
- Wang, C., Esaki, T., Xie, M. y Qiu, C. (2006): Landslide and debris-flow hazard analysis and prediction using GIS in Minamata–Hougawachi area, Japan. *Environmental Geology*, 51: 91–102.
- Yalcin, A., Reis, S., Aydinoglu, A.C. y Yomralioglu, T. (2011): A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *Catena*, 85: 274–287.

MANUSCRITO RECIBIDO EL 10 DE FEBRERO DE 2012.

ACEPTADO EL MANUSCRITO REVISADO EL 14 DE JUNIO DE 2012.