

# SUSCEPTIBILIDAD A LA OCURRENCIA DE FLUJOS DE DETRITOS, MEDIANTE SIG, EN UNA PORCIÓN DEL DEPARTAMENTO DE IGLESIA, SAN JUAN

María Yanina ESPER ANGILLIERI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CONICET- Gabinete de Neotectónica y Geomorfología, INGENIO. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan, San Juan. E-mail: yaninaesper@gmail.com

## RESUMEN

En el presente trabajo se emplean el índice estadístico  $W_i$  y la relación de frecuencias  $Fr$ , mediante el uso de sistemas de información geográfica, en la evaluación de la susceptibilidad del terreno a ser afectado por flujos de detritos. El área de estudio comprende un sector del departamento de Iglesia de San Juan a los 30°S de latitud media. Para la aplicación de los métodos indicados se crearon los siguientes mapas temáticos: mapa inventario de flujos de detritos, litológico, elevación, pendiente e insolación. El inventario se elaboró mediante el análisis digital y la interpretación de fotografías aéreas e imágenes satelitales, apoyado por trabajo de campo. La litología fue obtenida a partir de cartas geológicas preexistentes. Las pendientes, orientaciones e insolación fueron calculadas, a partir de un modelo digital de elevaciones. Los mapas de susceptibilidad generados incluyeron cinco categorías: muy baja, baja, moderada, alta y muy alta. Finalmente, estos mapas, fueron validados espacialmente y como resultado se observó el grado de predicción de ambos modelos fue similar, donde el 82,65 % (modelo  $W_i$ ) y el 82,71 % (modelo  $Fr$ ) de los flujos coincidieron con las clases alta y muy alta.

**Palabras clave:** *Susceptibilidad, flujos de detritos, mapas temáticos, SIG*

## ABSTRACT

*Debris flows susceptibility mapping in a portion of the Iglesia Department, San Juan, using GIS*

The statistical index ( $W_i$ ) and frequency ratio ( $Fr$ ) models are applied for analysis of debris flows susceptibility in a portion of the Iglesia department of San Juan around 30°S latitude, by means of an investigation based on the Geographic Information System. For this purpose were used thematic layers: debris flows inventory, lithology, elevation, slope, aspect, and solar radiation. The debris flow inventory map was prepared by interpreting aerial photographs and satellite images, supported by field surveys. Lithology was extracted from an existing geological map. Slope, aspect and solar radiation were calculated from a digital elevation model. Both models helped produce debris flows susceptibility maps that classified susceptibility into five categories: very low, low, moderate, high and very high. Subsequently each debris flows susceptibility map was compared with known debris flows locations and tested. As a result, both models have similar prediction, where the 82.65% (statistical index model) and the 82.71% (frequency ratio model) of the flows coincided with the high and very high categories.

**Keywords:** *Susceptibility, debris flows, thematic layers, GIS*

## INTRODUCCIÓN

Un flujo de detritos (FD) es un tipo de proceso de remoción en masa de material saturado en agua que se desplaza relativamente rápido, bajo la influencia de la gravedad pendiente abajo, lo que le otorga la forma de un líquido viscoso, capaz de transportar grandes bloques de rocas, árboles e incluso viviendas con relativa facilidad (Cruden y Varnes 1996). Este proceso geomorfológico es dominante en los Andes y pre-Andes áridos de San Juan y

está principalmente relacionado a lluvias esporádicas, de corta duración y gran intensidad (Moreiras 2004a, 2004b, 2005a, 2005b, 2006, Esper Angillieri 2011).

La determinación de la susceptibilidad del terreno a la ocurrencia de FD tiene como objeto agrupar el área de estudio, en áreas homogéneas de acuerdo a su probabilidad de ocurrencia y en base a características propias del terreno (Varnes 1978, Brabb, 1984).

En el presente trabajo, el análisis de susceptibilidad a la ocurrencia de FD fue lle-

vado cabo mediante la aplicación de dos métodos estadísticos, el índice estadístico  $W_i$  (Van Westen 1997) y la relación de frecuencias (Bonham Carter 1994). Ambos métodos, bivariantes, se basan principalmente en el análisis cruzado entre el mapa inventario de flujo de detritos y los mapas de sus factores condicionantes seleccionados (litología, elevación, pendiente, orientación e insolación).

Las variables o factores condicionantes de los flujos de detritos han sido seleccionadas a partir de un análisis previo, per-

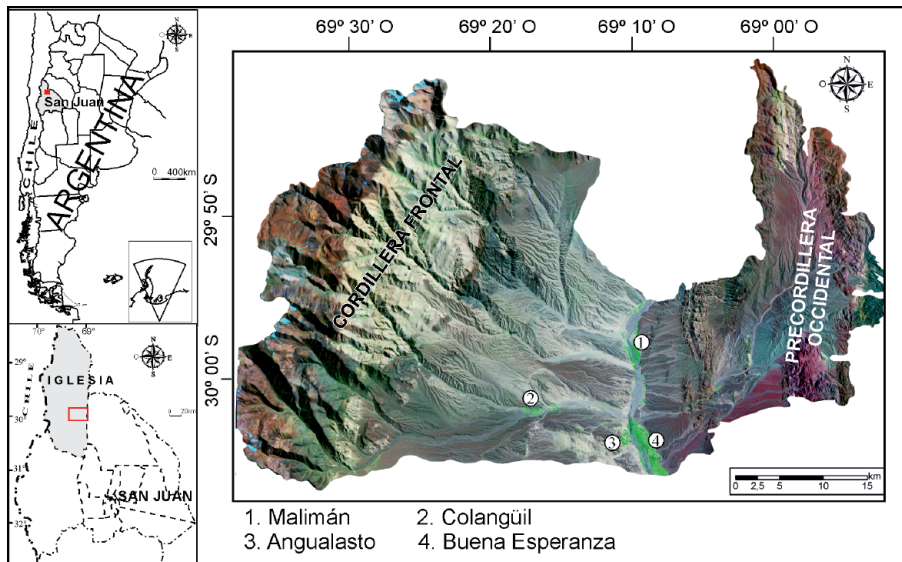


Figura 1: Ubicación del área de estudio.

mitiendo descartar la utilización de otras como índice de vegetación, distancia a fallas, distancia a rutas, entre otras, que por no considerarse influyentes en la inestabilidad de laderas de este sector. Cuando se incrementa el número de variables no necesariamente mejora la calidad de predicción, para Moreiras (2004, 2009) el modelo óptimo resultó al considerar solamente las variables: litología, pendiente y elevación.

En varios artículos, modelos como el  $W_i$  y  $F_r$  han sido usados en el cálculo de la susceptibilidad de procesos de remoción en masa. Entre los recientes pueden mencionarse: Lee y Sambath (2006), Lee y Pradhan (2007), Nandi y Shakoor (2010), Yalcin *et al.* (2011), entre otros. Entre los escasos trabajos relacionados al estudio de la susceptibilidad a la ocurrencia solamente de flujo de detritos, pueden encontrarse los de 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 conocer las zonas más susceptibles a ser afectadas por flujo de detritos mediante la utilización del índice de estadístico  $W_i$  y la relación de frecuencias en un sector del departamento Iglesia, provincia de San Juan, Argentina y que dicho análisis resulte de base para el posterior estudio de peligrosidad. Este sector es propenso a la ocurrencia de

este tipo de eventos y si bien, estos 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 (Fig. 1) (Perucca y Esper Angillieri 2011). Otros estudios relacionados al sector bajo estudio y la temática propuesta son los de Esper Angillieri (2009, 2010a, 2010b, 2011).

## ÁREA DE ESTUDIO

### Ubicación

El sector de estudio abarca una superficie de 2176 km<sup>2</sup> y se emplaza en el centro oeste de la República Argentina, 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.s.n.m. y máxima de 5639 m.s.n.m., laderas muy abruptas con pendientes de 45° y pobremente vegetadas (la vegetación dominante es la estepa arbustiva con cobertura general del 20 al 30%).

### Clima

El clima es semiárido con veranos cortos e inviernos rigurosos de bajas temperaturas (-18°C a 0°C). El régimen anual de precipitaciones es irregular, con periodos

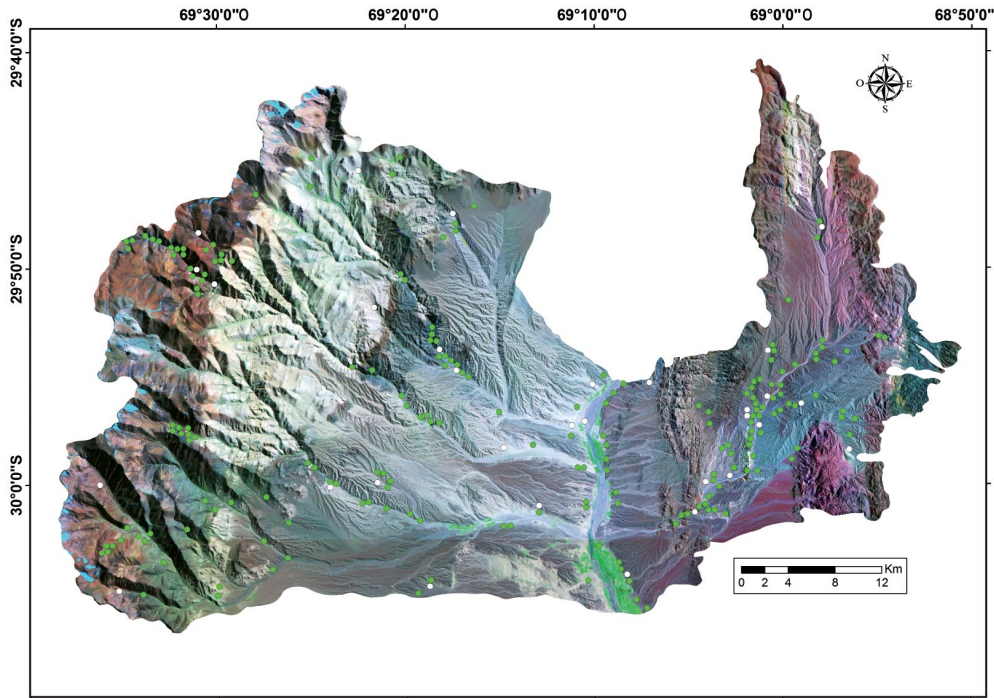
de escasas precipitaciones a épocas de tormentas severas. La mayor tormenta registrada en un día fue de 52 mm el 26 de diciembre de 1967 con una intensidad de 104 mm/h. La precipitación media anual es de 44,9 mm; de los cuales el 80% corresponde a lluvias que acontecen en el período diciembre-marzo, 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 23,01°C y el más frío julio con 7,91°C. Las temperaturas máxima y mínima promedio anual son de 23,21°C y 6,18°C respectivamente, la máxima absoluta promedio es de 35,4°C y la mínima absoluta promedio es de -12,1°C. La humedad relativa media es de 42%; la máxima mensual media corresponde a junio con 49% y la mínima a marzo con 35%.

### Geología

El área de estudio comprende dos unidades morfoestructurales principales, la Precordillera Occidental (Rolleri y Baldi 1969) y la Cordillera Frontal (Groeber 1938). En Cordillera Frontal la unidad aflorante más antigua comprende grauvascas intercaladas con areniscas y conglomerados del Carbonífero superior - Pérmico inferior. Sobre estos se apoya, en discordancia angular, un complejo volcánico e ígneo del Pérmico - Triásico Inferior de composición mesosilíceas y silíceas. 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.

La estructura de la zona se caracteriza por una faja corrida y plegada de tipo piel gruesa en Cordillera Frontal y una faja corrida y plegada epidérmica en el ámbito de Precordillera, estructuras generadas como consecuencia de la actuación del ciclo de compresión andino (Mioceno). La vergencia general es oriental, con retro-



**Figura 2:** Mapa inventario de flujos de detritos.

corrimientos importantes en los bordes occidentales de los principales cordones montañosos, con rumbo predominantemente norte sur (Allmendinger *et al.* 1990).

## METODOLOGÍA

De las variables que pueden condicionar en mayor medida la ocurrencia o no de flujos de detritos dentro del área de estudio, se seleccionaron elevación, pendiente, insolación, orientaciones y litología. Dichas variables, junto a los flujos de detritos inventariados (Esper Angillieri 2010, 2011), son la base a partir de la cual se generan los modelos de susceptibilidad.

En la creación del inventario de flujos de detritos se adoptó como criterio mapear las áreas en su conjunto (zona de arranque y la zona de acumulación) con el objeto de obtener mapas que reflejen las áreas más susceptibles de ser afectadas para que dichos procesos y que posteriormente resulten útiles para la creación de mapas de peligrosidad del sector considerado en estudio. El mapa inventario de flujos de detritos (Fig. 2), fue preparado a partir de la interpretación de fotografías aéreas (escala 1:15.000), adquiridas a través de vuelos regionales realizados en los meses de otoño del periodo 1961-1963, faci-

tadas por Secretaría de Minería Provincial; imágenes satelitales Landsat (MDA Federal 2004): TM Mosaicos S-19-25 (25/01/1985 y 22/04/1990); TM Mosaicos S-19-30 (30/07/1986 y 13/04/1990) y ETM+ Mosaicos S-19-30 (03/12/1999 y 20/09/2002); ETM+ Mosaicos S-19-25 (05/02/2000 y 20/09/2002) y reconocimientos de campo. Además han sido utilizadas las siguientes imágenes de gran resolución (*Spot 5* y *QuickBird*): SPOT 5 (02/04/2008), color - 2,5m de resolución (CNES 2008). QuickBird (03/12/2005), color 2,44m ID: 1010010004AF1801; (02/09/2006), color 2,44m ID: 1010010052D9301; (25/07/2002), color 2,44m ID: 1010010000DE8604 (Digital Globe 2002). La litología se basó en hojas geológicas del Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR), 3169-I. Rodeo (Cardó *et al.* 1998) y 2969-III. Malimán (Cardó *et al.* 2001), a escala 1:250.000 y la hoja Geológica 17b. Guandacol (Furque 1963), a escala 1:200.000 de la Dirección Nacional de Geología y Minería. Las distintas unidades litológicas aflorantes, se han agrupado en 19 clases: 1- sedimentitas del Ordovícico inferior; 2- conglomerados, areniscas y pelitas del Devónico; 3,4,5 y 6- sedimentitas marinas del Carbonífero; 7, 10 y 11- granitos; 8- granodiori-

tas; 9- riolitas; 12- complejo volcánico-ígneo; 13- tobas multicolores; 14- intrusivos miocenos; 15- argilitas miocenas; 16 y 17- depósitos del Pleistoceno; 18- limos y arcillas; y 19- depósitos recientes (Fig. 3). El modelo digital de elevaciones (MDE) fue creado a partir de información topográfica obtenida de la misión topográfica *Radar Shuttle* (USGS 2006) combinada con información obtenida a de cartas topográficas a escala 1:50.000 y 1:100.000 del Instituto Geográfico Militar. En ambiente SIG (ArcGis 9x), a partir del MDE, fueron calculados los mapas de pendiente, orientaciones e insolación. Las orientaciones varían desde  $-1^\circ$  (plano) a  $360^\circ$  (norte). Este ha sido reclasificado en cinco clases (Fig. 3). 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. 3).

La relación espacial entre la ocurrencia de los flujos de detritos y cada una de las clases de cada variable seleccionada, ha sido analizada utilizando el índice  $W_i$  y la  $F_r$ . El índice  $W_i$  de Van Westen (1997), es definido, mediante la Ecuación 1, como el logaritmo natural de la densidad de flujos



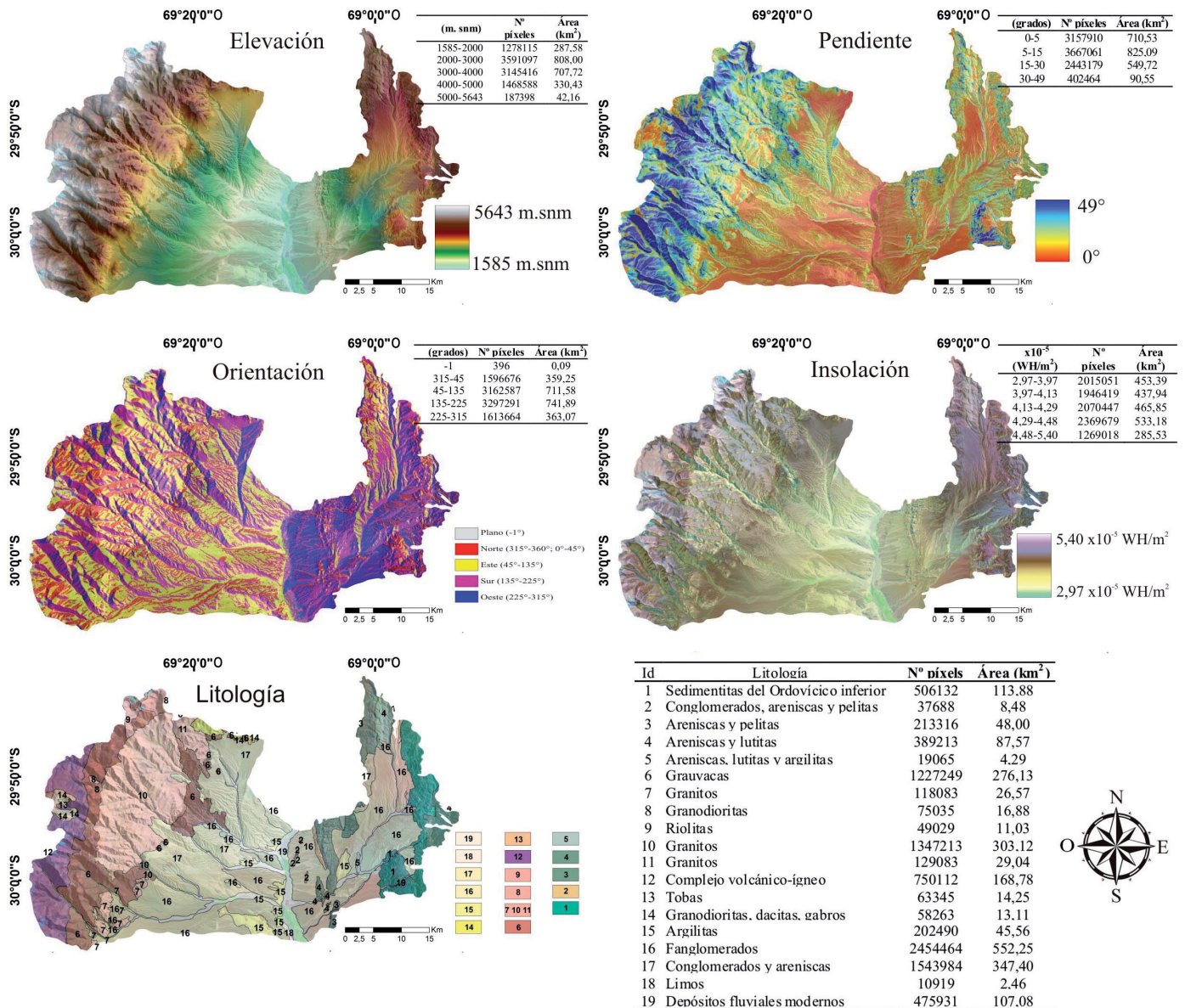


Figura 3: Mapas de variables condicionantes a la ocurrencia de flujos de detritos.

de detritos para una clase sobre la densidad de flujos de detritos para el área total de estudio.

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

Donde:

$W_i$  = el peso asignado a una variable específica

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

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

$N_{pix}(Si)$  = el número de píxeles que contienen flujos de detritos en la clase de la

variable temática

$N_{pix}(Ni)$  = el número de total píxeles dentro de la zona de estudio, para la clase de la variable considerada

El método probabilístico ( $F_r$ ) denominado relación de frecuencias se define como la razón aritmética entre el área o número de píxeles de la clase que es efectivamente afectada por flujos de detritos y el área total de la clase, de la variable considerada (Bonham Carter 1994). Si el valor de  $F_r$  es mayor a 1, la correlación entre la ocurrencia de flujos de detritos y las variables consideradas, es alta, mientras que si  $F_r$  es menor a 1 la correlación es baja.

$$F_r = \frac{N_{pix}(PRM)}{N_{pix}(PRM)} / \frac{N_{pix}(A)}{N_{pix}(At)} \quad (2)$$

Donde:

$F_r$  = valor de la relación de frecuencias

$N_{pix}(FD)$  = número de píxeles que contienen flujos de detritos en la clase de la variable temática.

$N_{pix}(FDt)$  = número de píxeles totales que contienen flujos de detritos.

$N_{pix}(A)$  = número total de píxeles para la clase de la variable considerada

$N_{pix}(At)$  = número de total píxeles dentro de la zona de estudio.

Los índices de susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos (ISFD), mediante la aplicación de ambos métodos, se obtuvieron acorde a la ecuación 3.

ISFD= litología + elevación + pendiente + orientación + insolación. (3)

(donde litología es el coeficiente  $W_i$  y  $F_r$  de la variable litología; elevación es el coeficiente  $W_i$  y  $F_r$  de la variable elevación; pendiente es el coeficiente  $W_i$  y  $F_r$  de la variable pendiente; orientación es el coeficiente  $W_i$  y  $F_r$  de la variable orientación e insolación es el coeficiente  $W_i$  y  $F_r$  de la variable insolación).

Finalmente, los mapas de susceptibilidad 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 susceptibilidad.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El área total de estudio posee un total de 9.670.614 píxeles (2.176 km<sup>2</sup>), de los cuales 155.058 píxeles (42,45 km<sup>2</sup>) representan la ocurrencia de flujos de detritos y equivalen a un número de 346 flujos de detritos identificados e inventariados. Para el análisis de susceptibilidad se ha utilizado una población de 214 flujos de detritos, el resto ha sido apartado arbitrariamente como grupo de control para la verificación espacial de los mapas obtenidos. El porcentaje de píxeles ocupado por flujos de detritos para cada clase de cada variable considerada se muestra en el cuadro 1.

El 44 % de píxeles que corresponden a flujos de detritos, se agrupan en fanglomerados, conglomerados y areniscas de edad pleistocena, más del 20 % lo hacen en las sedimentitas marinas carboníferas mientras que en el resto de las clases la ocurrencia es mínima (Fig. 4).

El mapa de elevaciones señala que las alturas en la zona de estudio oscilan entre 1585 m.s.n.m y 5643 m. s n m (Fig. 3). El 72,44 %, de los píxeles que indican ocurrencia de flujos de detritos, se agrupan en el interva-

**CUADRO 1:** Coeficientes del índice  $W_i$  y  $F_r$  para cada variable.

Factor	Clase	Nº de píxeles con FD	% de píxeles con FD	Píxeles totales	Píxel %	$W_i$	$F_r$
Litología	1	378	0.24	506132	5.234	-3,067	0,047
	2	0	0.00	37688	0.390	0,000	0,000
	3	0	0.00	213316	2.206	0,000	0,000
	4	112	0.07	389213	4.025	-4,020	0,018
	5	572	0.37	19065	0.197	0,627	1,871
	6	31407	20.26	1227249	12.690	0,468	1,596
	7	4150	2.68	118083	1.221	-0,950	2,192
	8	501	0.32	75035	0.776	0,785	0,416
	9	0	0.00	49029	0.507	-0,876	0,000
	10	3977	2.56	1347213	13.931	0,000	0,184
	11	1099	0.71	129083	1.335	-1,692	0,531
	12	4650	3.00	750112	7.757	-0,633	0,387
	13	0	0.00	63345	0.655	0,000	0,000
	14	3909	2.52	58263	0.602	1,431	4,184
	15	13260	8.55	202490	2.094	1,407	4,084
	16	51924	33.49	2454464	25.381	0,277	1,319
	17	17237	11.12	1543984	15.966	-0,362	0,696
	18	242	0.16	10919	0.113	0,324	1,382
	19	21640	13.96	475931	4.921	1,042	2,836
Altitud [m s.n.m.]	1585-2000	39543	25,50	1278115	13,216	0,657	1,930
	2000-3000	72790	46,94	3591097	37,134	0,234	1,264
	3000-4000	36573	23,59	3145416	32,526	-0,321	0,725
	4000-5000	6152	3,97	1468588	15,186	-1,342	0,261
	5000-5643	0	0,00	187398	1,938	0,000	0,000
Pendiente (grados)	0-5	87351	56,33	3157910	32,655	0,545	1,725
	5-15	53350	34,41	3667061	37,920	-0,097	0,907
	15-30	12949	8,35	2443179	25,264	-1,107	0,331
	30-49	1408	0,91	402464	4,162	-1,522	0,218
Orientación (grados)	-1	0	0,00	396	0,004	0,000	0,000
	315-45	16207	10,45	1613220	16,682	-0,467	0,627
	45-135	46808	30,19	3162587	32,703	-0,080	0,923
	135-225	67039	43,23	3297291	34,096	0,237	1,268
	225-315	25004	16,13	1597120	16,515	-0,024	0,976
Insolación $\times 10^{-5}$ (WH/m <sup>2</sup> )	2,97-3,97	43995	28,37	2015051	20,837	0,309	1,362
	3,97-4,13	31192	20,12	1946419	20,127	-0,001	0,999
	4,13-4,29	39799	25,67	2070447	21,410	0,181	1,199
	4,29-4,48	32434	20,92	2369679	24,504	-0,158	0,854
	4,48-5,40	7638	4,93	1269018	13,122	-0,980	0,375

lo de 1585 a 3000 m.s.n.m (Fig. 4).

El mapa de pendientes indica que, en el área de estudio, las pendientes oscilan entre 0° y 49° (Fig. 3) y que la mayor población de flujos de detritos se concentra en pendientes menores de 15° (Fig. 4).

Según la variable orientaciones los flujos de detritos ocurren en laderas que miran al este (30,19 %) y al sur (43,23 %) (Fig. 4). La insolación adopta valores desde  $2,97 \times 10^{-5}$  [WH/m<sup>2</sup>] a  $5,40 \times 10^{-5}$  [WH/m<sup>2</sup>] (Fig. 3). En la figura 4 puede observarse que en las dos clases de mayor insolación tuvo lugar el 54% de los flujos de detritos, marcando una tendencia cre-

ciente en el porcentaje de flujos cuanto mayor es la insolación.

En el cuadro 1 se muestran los coeficientes obtenidos en la aplicación de los métodos  $W_i$  y  $F_r$ .

De acuerdo al mapa de susceptibilidad obtenido a partir de la aplicación del modelo  $W_i$ , el 8,49 % del área total corresponde a zonas de muy baja susceptibilidad. Zonas de muy baja, baja, moderada, alta y muy alta susceptibilidad, presentan 8,94 %, 24,97 %, 26,24 %, 35,14 % y 4,14 % del total de área, respectivamente (Fig. 5, Cuadro 2).

El mapa resultante de la aplicación de la

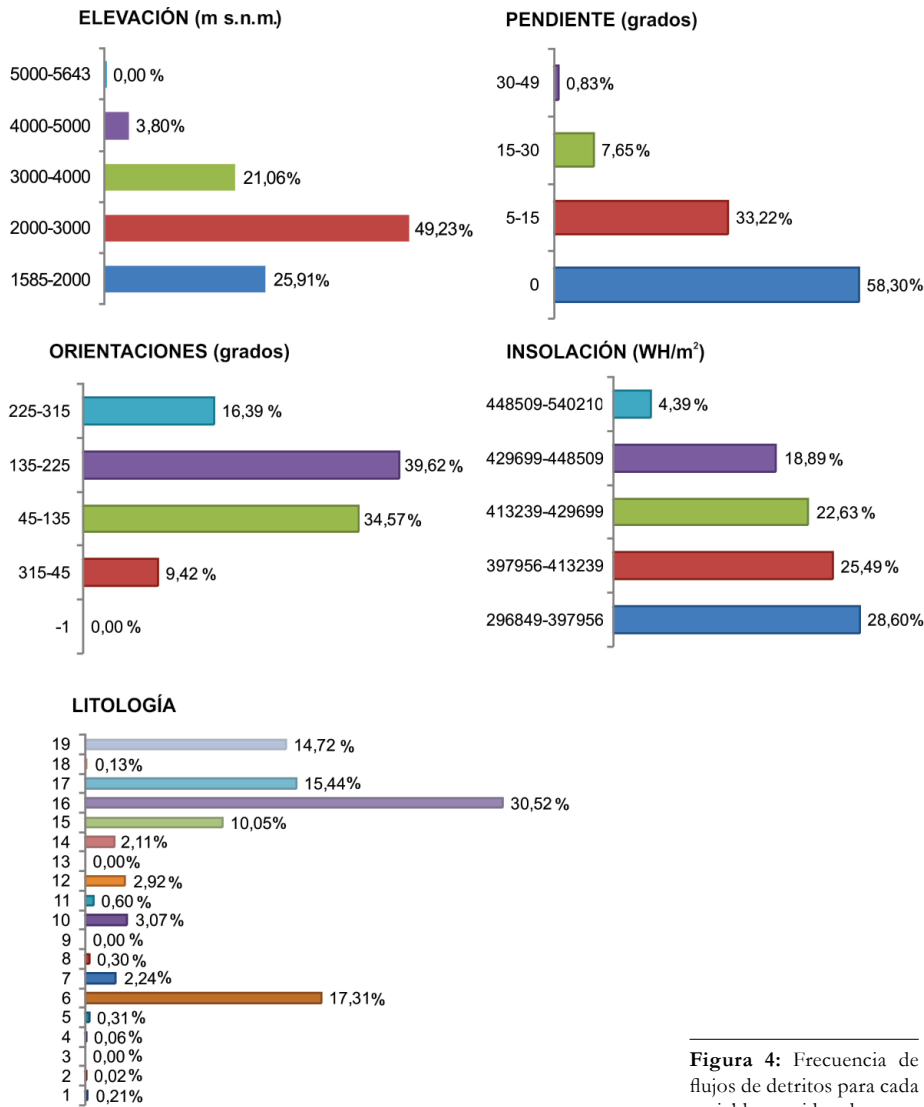


Figura 4: Frecuencia de flujos de detritos para cada variable considerada.

CUADRO 2: Validación espacial de los mapas de susceptibilidad mediante una población de puntos de control.

	Fr			Wi		
	ISFD	Área (%)	% área FD	ISFD	Área (%)	% área FD
Muy baja	1,11-2,54	4,60	0,18	-7,31--4,32	8,94	1,31
Baja	2,54-4,44	29,20	7,26	-4,32--2,11	24,97	5,08
Moderada	4,44-5,5	19,28	9,85	-2,11-0,10	26,24	10,96
Alta	5,5-8,24	39,35	50,09	0,10-2,31	35,71	56,90
Muy alta	8,24-11,04	7,57	32,62	2,32-3,15	4,14	25,75

Fr, en comparación con el anterior, exhibe también bajos porcentajes para las zonas de muy baja susceptibilidad (4,60 %), similares valores (29,20 %) para las clase baja, menor porcentaje (19,28 %) para la clase moderada, similar para la clase de alta susceptibilidad (39,35 %) y bajos porcentajes (7,57 %) para las zonas de muy

alta susceptibilidad. Además el porcentaje de las clases más altas (alta + muy alta) es del 46,9% para la Fr mientras que el Wi es del 39,81 % (Fig. 5, Cuadro 2).

En base a estos resultados puede concluirse que las zonas de mayor susceptibilidad a ser afectadas por flujos se sitúan en los sectores bajos y de poca pendiente, lo cual

resulta contradictorio al hecho de que estos procesos son frecuentemente generados en las zonas elevadas y de fuerte pendiente. Resultados similares obtuvo Moreiras (2004, 2009) y estos resultados pueden ser explicados por el criterio de mapeo en la construcción del inventario, lo cual puede justificarse porque este tipo de proceso, una vez generado, en general recorre grandes extensiones abarcando zonas de baja pendiente y altitud. Si solo se hubiera mapeado las zonas de arranque o de generación de los flujos de detritos estos mapas base resultarían en mapas de peligrosidad poco representativos. Los resultados obtenidos en la validación espacial de los mapas de susceptibilidad a partir de la comparación entre estos y la población de puntos, que representan ocurrencia de flujos de detritos, seleccionados arbitrariamente y que no han sido utilizados en la confección de dichos mapas, se muestran en la cuadro 2. Como resultado, ambos mapas obtenidos muestran similar predicción (82,65 % y 82,71 %) para las clases de alta y muy alta susceptibilidad de  $W_i$  y  $F_r$  respectivamente.

La precisión de los mapas de susceptibilidad creados está relacionada a la correcta identificación y mapeo de los flujos de detritos y a la resolución espacial del modelo digital de elevaciones (90 m) y sus variables derivadas (pendiente, 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 a la ocurrencia de flujos de detritos sean de mayor resolución. Sin embargo, estos mapas, han sido positivamente testeados el 23 de enero de 2010 a efecto de lluvias torrenciales que desencadenaron flujos de detritos que afectaron la localidad de Malimán de Arriba. Como consecuencia, se dañaron viviendas, se perdió la mayor parte de la cosecha y el ganado, los canales de riego, la escuela de la localidad y el puente, aguas abajo, que une las localidades de Angualasto y Buena Esperanza sufrieron importantes daños también. Este evento valida positivamente los mapas



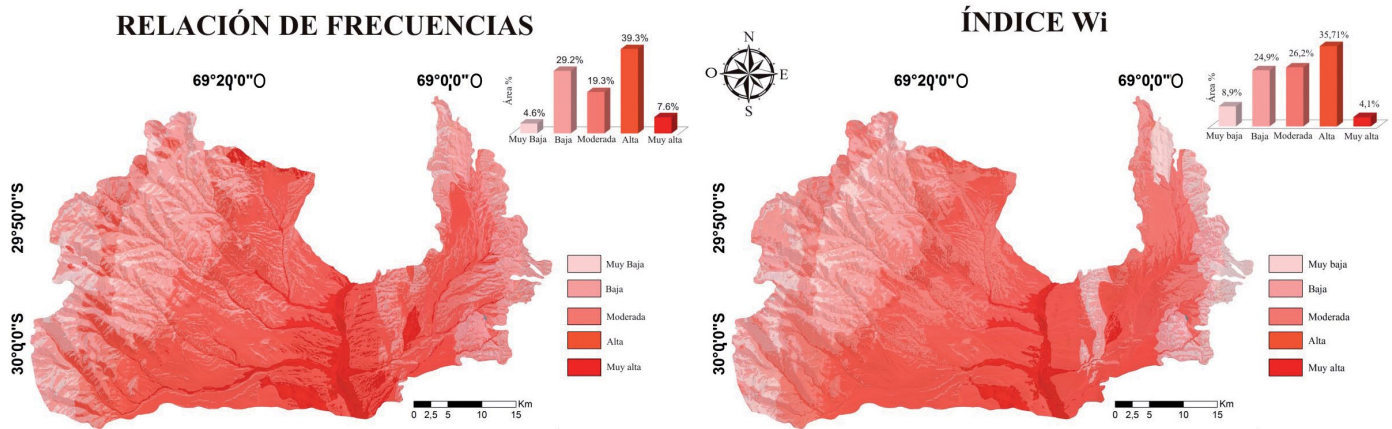


Figura 5: Mapas de Susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos.

obtenidos ya que el área total afectada por él se localiza en las clases de alta y muy alta susceptibilidad.

## CONCLUSIONES

La validación espacial señala que los mapas obtenidos mediante la aplicación de los métodos estadísticos  $W_i$  y  $F_r$  muestran similar predicción, superior al 82 % de las zonas efectivamente identificadas, para las clases de alta y muy alta susceptibilidad.

Ambos métodos se caracterizan por su simpleza en el cálculo y la facilidad de la aplicación e implementación de las variables seleccionadas junto al mapa inventario de flujos de detritos, incluso gran cantidad de información puede ser procesada de manera simple y rápida.

Estos tipos de mapas de susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos, como los aquí presentados, permitirían un posterior análisis de peligrosidad, desarrollar protocolos de actuación en caso de desastre y resultan ser de gran utilidad para los especialistas, al momento de diseñar medidas de contención y/o mitigación que ayuden a reducir pérdidas y al elegir posibles locaciones para la construcción de nuevas infraestructuras.

Finalmente, se concluye que resulta muy ventajosa la utilización de los SIG debido a la obtención automática de la mayor parte de los parámetros relacionados con la ocurrencia de los flujos de detritos, la facilidad de análisis y cálculos en la construcción y validación de los modelos de

susceptibilidad y principalmente por la aplicabilidad y reproductibilidad de los resultados.

## AGRADECIMIENTOS

La presente contribución fue financiada con fondos de CONICET. La autora expresa su sincero agradecimiento a los evaluadores por sus valiosas sugerencias que contribuyeron al mejoramiento de este trabajo.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- 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.
- Bonham Carter, G.F. 1994. *Geographic Information Systems for Geoscientists, Modeling with GIS*. Pergamon Press, 398 p., Oxford.
- Brabb, E.E. 1984. Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping. 4° International Symposium on Landslides 1: 307-324, Toronto.
- Cardó, R., Diaz, I., Cegarra, M., Rodríguez, R., Heredia, N. y Santamaría, G. 1998. Hoja Geológica 3169-I Rodeo, Servicio Geológico Minero Argentino (inédita), 70 p., Buenos Aires.
- Cardó, R., Diaz, I., Poma, S., Litvak, V., Santamaría, G. y Limarino, C.O. 2001. Hoja Geológica 2969-III Malimán, Servicio Geológico Minero Argentino, (inédita), 67 p., Buenos Aires.
- Carrara, A., Crosta, G. y Frattini, P. 2008. Com-

paring models of debris-flow susceptibility in the alpine environment. *Geomorphology* 94: 353-378.

Christenson, G.E. 1986. Debris-flow mapping and hazards assessment in Utah. En Kusler, J. y Brooks, G. (eds.) *Improving the effectiveness of floodplain management in arid and semi-arid regions*, Proceedings, Association of State Floodplain Managers: 74-77.

Centro Nacional de Estudios Espaciales (CNES). 2008. Imagen SPOT 5 (02/04/2008), color - 2,5m de resolución. ID: 56724100804021441472J.

Cruden, D.M. y Varnes, D.J. 1996. Landslide types and processes. En Turner A. y Schuster R.L. (eds.) *Landslides, Investigation and Mitigation*, Transportation Research Board, Special Report 247,47, National Academy Press: 36- 75, Washington D.C.

Digital Globe. 2002. Imágenes QuickBird, ID: 1010010004AF1801, ID: 10100100052D9301, ID: 1010010000DE8604.

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: 396-05.

Esper Angillieri, M.Y. 2010b. Peligros geológicos asociados a procesos de remoción en masa e inundaciones con características des-

- tructivas. Área de amortiguación del Parque Nacional San Guillermo. Provincia de San Juan (San Juan, Argentina). Tesis doctoral, Universidad Nacional de San Juan (inédita), 235 p., San Juan.
- 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*, Espasa-Calpe, 492 p., Buenos Aires.
- Furque, G. 1963. Descripción Geológica de la Hoja 17b Guandacol, Boletín Dirección Nacional de Geología y Minería 92: 1-04. Buenos Aires.
- 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.
- Jackson, L.E., Jr. 1987. Debris flow hazard in the Canadian Rocky Mountains, Geological Survey of Canada Paper 86: 11-20.
- Lee, S. y Sambath, T. 2006. Landslide susceptibility mapping in the Damrei Romel area, Cambodia using frequency ratio and logistic regression models, *Environmental Geology* 50: 847-855.
- Lee, S. y Pradhan, B. 2007. Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models, *Landslides* 4: 33-41.
- 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.
- Melelli, L. y Taramelli, A. 2004. An example of debris-flows hazard modeling using GIS. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 4: 347-358.
- Moreiras, S.M. 2004a. Landslide incidence zonation in the Rio Mendoza Valley, Mendoza province, Argentina. *Earth Surface Processes and Landforms* 29: 255-266.
- Moreiras, S.M. 2004b. Zonificación de peligrosidad y riesgo de procesos de remoción en masa en el valle del Río Mendoza. Tesis doctoral, Universidad Nacional de San Juan, (inédita), 200 p., San Juan.
- Moreiras, S.M. 2005a. Landslide susceptibility zonation in the Rio Mendoza Valley, Argentina. *Geomorphology* 66: 345-357.
- Moreiras, S.M. 2005b. Climatic effect of ENSO associated with landslide occurrence in the Central Andes, Mendoza Province, Argentina. *Landslide* 2: 53-59.
- Moreiras, S.M. 2006b. Frequency of debris flows and rockfall along the Mendoza river valley (Central Andes), Argentina. *Quaternary International* 158: 110-121.
- Moreiras, S.M. 2009. Análisis estadístico probabilístico de las variables que condicionan la inestabilidad de las laderas en los valles de los ríos Las Cuevas y Mendoza. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65: 780-790.
- Nandi, A. y Shakoor, A. 2010. A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses. *Engineering Geology* 110: 11-20.
- 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 Baldis, B. 1969. Paleogeography and distribution of Carboniferous deposits in the Precordillera, Argentina. En *Coloquio de la I.U.G.S. La estratigrafía del Gondwana*, Ciencias de la Tierra 2. UNESCO: 1005-1024, Paris.
- 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.
- Van Westen, C.J. 1997. Statistical landslide hazard analysis. ILWIS 2.1 for Windows application guide. ITC Publication, 73-84. Enschede.
- Varnes, D.J. 1978. Slope movement types and processes. En Schuster R.L y Krizek R.L. (eds.) *Landslides: Analysis and Control*. Transportation Research Board Special Report 176:11-33, National Academy of Sciences, Washington.
- 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.

Recibido: 3 de mayo, 2012

Aceptado: 3 de agosto, 2013