

**Deliverable E 2.1.2: Informe técnico de  
susceptibilidad a movimientos de ladera – Arruda  
dos Vinhos Test Site (Portugal)**

**Informe del GT2 - Actividad 2.1: Cartografía de  
susceptibilidad/peligrosidad**

**Due date of deliverable:** 30/09/2020

**Actual submission date:** 11/09/2020

**Lead contractor for this deliverable:** IGOT-ULISBOA

**Autores**

José Luís Zêzere, Ricardo Garcia, Sérgio Oliveira, Susana Pereira,  
Raquel Melo, Eusébio Reis, Pedro Pinto Santos



## **ÍNDICE**

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>3</b>
<b>2. MODELO PARA EVALUAR LA SUSCEPTIBILIDAD A LOS MOVIMIENTOS DE LADERA .....</b>	<b>5</b>
2.1. INVENTARIO DE MOVIMIENTOS DE LADERA .....	5
2.2. FACTORES DE PREDISPOSICIÓN .....	7
2.3. MÉTODO ESTADÍSTICO - VALOR INFORMATIVO (VI) .....	9
2.4. CLASIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE SUSCEPTIBILIDAD .....	10
<b>3. RESULTADOS - SUSCEPTIBILIDAD A LOS MOVIMIENTOS DE LADERA .....</b>	<b>12</b>
3.1 SUSCEPTIBILIDAD A LOS MOVIMIENTOS DE LADERA - AJUSTE DEL MODELO .....	12
3.2 SUSCEPTIBILIDAD A LOS MOVIMIENTOS DE LADERA - EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE PREDICCIÓN .....	17
<b>4. CONCLUSIONES .....</b>	<b>29</b>
<b>5. REFERENCIAS.....</b>	<b>29</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

El GT2 se basa en el desarrollo de herramientas cartográficas de prevención de riesgos para su aplicación en la ordenación del territorio y la planificación de emergencias. Las principales herramientas a desarrollar incluyen la creación y actualización de la cartografía de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo en las regiones costeras del SUDOE, adaptada a los diferentes escenarios de riesgo futuros derivados del cambio climático.

La Actividad 2.1 - Cartografía de susceptibilidad/peligros, del GT 2 del proyecto RISKCOAST, tiene como objetivo producir cartografía de susceptibilidad para los peligros relevantes en cada región costera del SUDOE, identificados en base a los estudios e inventarios obtenidos en el GT1, utilizando métodos estadísticos y/o deterministas.

El objetivo principal de este informe técnico (E.2.1.2) es, en el caso de la cuenca del Río Grande da Pipa (RGP), situada en la región norte de Lisboa (Fig.1), definir el conjunto de procedimientos necesarios para la evaluación de la susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos de ladera basados en métodos estadísticos. La inestabilidad de las laderas es uno de los principales riesgos geomorfológicos que afectan a la zona de estudio (Garcia y Oliveira, 2020).

La cartografía de la susceptibilidad se basó en métodos estadísticos, seleccionados según los datos de referencia disponibles. La cartografía de peligrosidad puede realizarse posteriormente a partir del análisis de la recurrencia temporal del factor desencadenante, o de los umbrales que se establezcan en el GT4.

En el caso de los modelos basados en la estadística, los factores de predisposición más adecuados para la predicción espacial de cada tipo de peligro se ponderan mediante el cruce con los inventarios de ocurrencia. Los resultados se validan con curvas de éxito y predicción y el cálculo del AAC (área bajo la curva). La concordancia espacial de los diferentes mapas se evalúa en una comparación *pairwise*.

La coordinación del GT2 está asegurada por el equipo IGOT-ULISBOA que establece los procedimientos metodológicos para la producción de herramientas cartográficas de prevención de riesgos. La aplicación de estas metodologías a las diferentes áreas de estudio será desarrollada posteriormente por cada uno de los beneficiarios que participan en el GT2. El equipo del IGOT-ULISBOA asegura a cada uno de los beneficiarios el apoyo técnico necesario para la aplicación de la metodología propuesta.

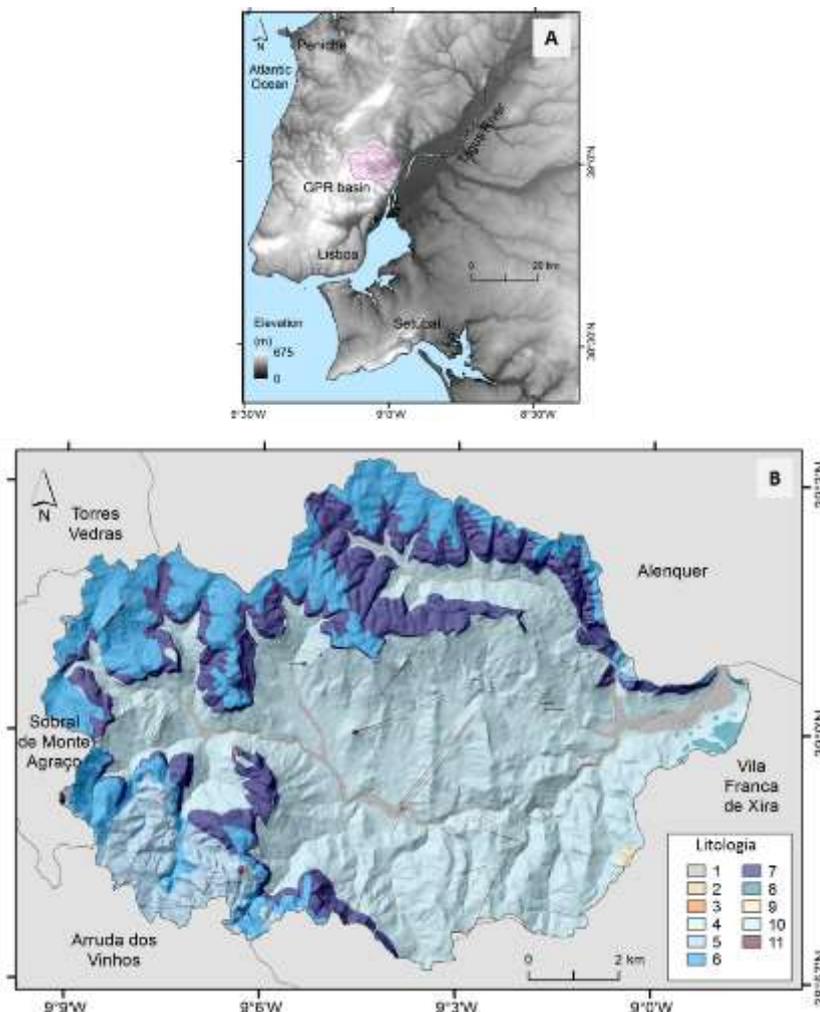


Figura 1 – Entorno geográfico de la cuenca del Río Grande da Pipa (RGP) (A). Distribución de las diferentes unidades litológicas en la zona de estudio (B): 1 - Aluvión; 2 - Caliza con intercalaciones; 3 - Conglomerados, areniscas y arcillas; 4 - Areniscas, margas y calizas; 5 - Calizas y margas; 6 - Arcillas, areniscas, margas y calizas; 7 - Calizas coralinas; 8 - Calizas; 9 - Arcositos; 10 - Margas, arcillas y areniscas; 11 - Filones y masas. Adaptado de Zbyszewski y Assunção (1965).

## 2. MODELO PARA EVALUAR LA SUSCEPTIBILIDAD A LOS MOVIMIENTOS DE LADERA

El modelo de evaluación de la susceptibilidad a los movimientos de ladera depende de la aplicación de un conjunto de procedimientos estandarizados, esquematizados en la Fig. 2, que son: i) la preparación de un inventario de movimientos de ladera; ii) la identificación de los factores de predicción; iii) la ponderación de los factores de predicción; iv) la preparación del modelo de predicción y la clasificación del mapa de susceptibilidad; y v) la evaluación del rendimiento, ajuste y capacidad de predicción del modelo.

El procedimiento metodológico ilustrado es independiente del número y del tipo de factores de predisposición utilizados (variable independiente), del tipo de inventario de movimientos de pendiente (variable dependiente) y del método estadístico de integración. Todas las variables se utilizan en la modelización con una celda (*pixel*) de 5 m x 5 m (25 m<sup>2</sup>).

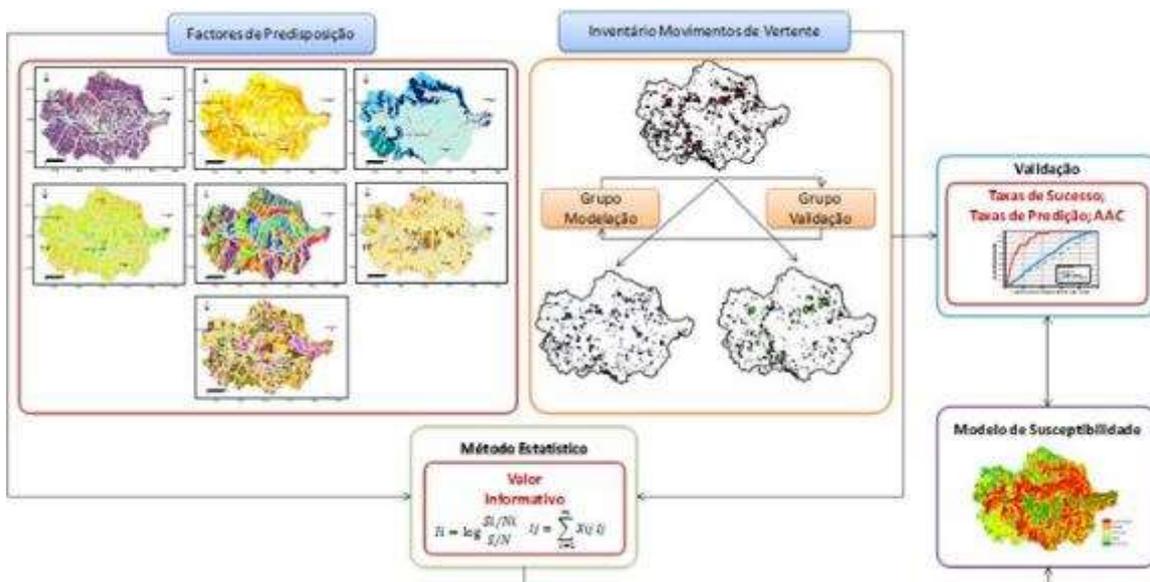


Figura 2 – Esquema metodológico para el desarrollo y validación de un modelo de susceptibilidad al movimiento de laderas basado en métodos estadísticos.

### 2.1. INVENTARIO DE MOVIMIENTOS DE LADERA

En la cuenca del Rio Grande da Pipa (RGP), se inventariaron 1434 movimientos de ladera (Fig. 3) que corresponden a un área total

inestabilizada de 6.484.402 m<sup>2</sup>, cerca del 5,9% del área de estudio que tiene aproximadamente 110,6 km<sup>2</sup> y una densidad de 13 movimientos de ladera/km<sup>2</sup>. La densidad expresada por el área inestabilizada es de 58.629 m<sup>2</sup>/km<sup>2</sup>. El tamaño medio de los movimientos de ladera es de 4698 m<sup>2</sup>, y el tamaño máximo y mínimo de los movimientos de ladera es de 262.194 m<sup>2</sup> y 6,6 m<sup>2</sup>, respectivamente. En la zona de estudio se identificaron los siguientes tipos de movimientos de ladera: D) desabamiento; B) derrumbe; R) deslizamiento rotacional profundo; RS) deslizamiento rotacional superficial; RSA) deslizamiento rotacional superficial en talud artificial; T) deslizamiento traslacional profundo; TS) deslizamiento traslacional superficial; TSA) deslizamiento traslacional superficial en talud artificial; E) flujo.

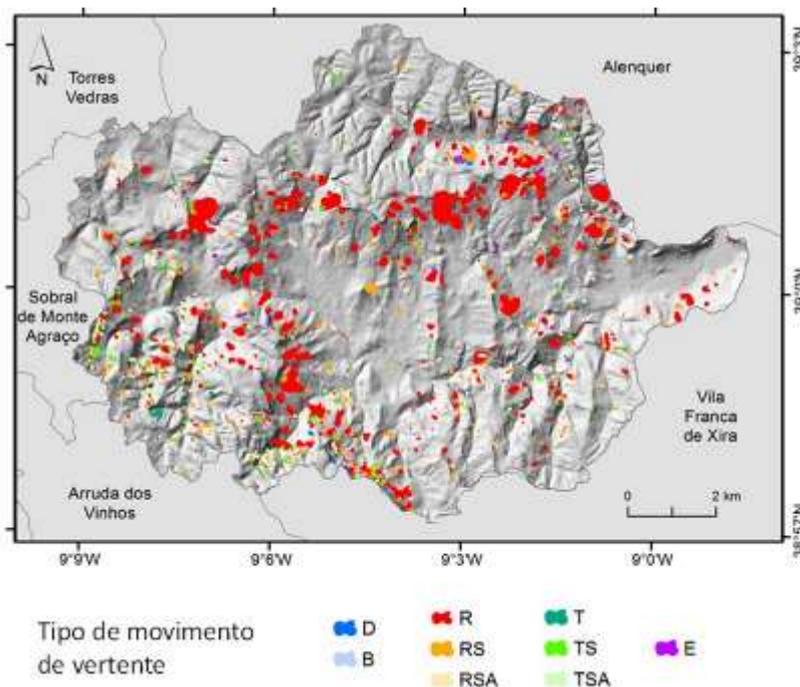


Figura 3 – Inventario con los 1434 movimientos de pendiente, separados por tipo de movimiento. D) Desabamiento; B) Derrumbe; R) Deslizamiento rotacional profundo; RS) Deslizamiento rotacional superficial; RSA) Deslizamiento rotacional superficial en talud artificial; T) Deslizamiento traslacional profundo; TS) Deslizamiento traslacional superficial; TSA) Deslizamiento traslacional superficial en talud artificial; E) Flujo.

La cronología relativa de los movimientos de ladera en la cuenca de la RGP se realiza mediante la verificación sistemática de la presencia/ausencia de movimientos en las fotografías aéreas y

ortofotomapas disponibles (Oliveira, 2012). La incertidumbre sobre la edad absoluta de los movimientos es bastante grande. El grupo más importante está formado por los movimientos anteriores al inicio del trabajo de campo en 2006 (casi 600 de los 1.434 movimientos de ladera del inventario), seguido de los grupos relacionados con los dos eventos de inestabilidad de 1983 y 2010, para los que se obtuvo un inventario completo de la zona de estudio. Algunos grandes movimientos parecen ser bastante antiguos y no hay garantía de que hayan sido provocados por las precipitaciones (Oliveira, 2012).

## 2.2. FACTORES DE PREDISPOSICIÓN

La elección de los factores predisponentes que generan la inestabilidad de las laderas constituye una tarea importante en la evaluación de la susceptibilidad, ya que se espera que esos factores tengan la capacidad discriminadora de captar las condiciones que generaron la inestabilidad del terreno en el pasado y en el presente. Estos factores de predisposición inherentes al terreno son estáticos, condicionando el nivel de inestabilidad potencial de las laderas y determinando la variación espacial del grado de susceptibilidad del territorio a la inestabilidad (Zêzere, 2005).

La elaboración de un Modelo Numérico de Elevación (MNE) para la cuenca del RGP se basó en un conjunto de procedimientos descritos por Reis (2006) con el fin de corregir los errores derivados de: (i) los datos de origen; (ii) el método de interpolación, y (iii) los errores derivados de las inexactitudes locales. Según Oliveira (2012), se utilizó un modelo altimétrico a escala 1:10 000, con curvas de nivel con una equidistancia de 5 m, y puntos cotizados, información proporcionada por la Associação de Municípios do Oeste, y este modelo fue debidamente compatibilizado con los datos altimétricos del Municipio de Vila Franca de Xira, a la misma escala e igual equidistancia entre curvas de nivel, para el sector del área de estudio inserto en el Área Metropolitana de Lisboa.

En la evaluación de la susceptibilidad a los movimientos de ladera se consideraron siete factores de predisposición con relevancia regional (Fig. 1; Fig. 4, Anexo I): litología (ULIT); suelos (SOLO); uso y cobertura del suelo (USOL), pendiente (DCV); exposición (EXP);

curvatura (CURV); y la inversa del índice de humedad (IWI) que en la práctica se define en trabajos más recientes como "relación pendiente sobre área". Los cuatro últimos factores se derivan de la EMN mencionada anteriormente.

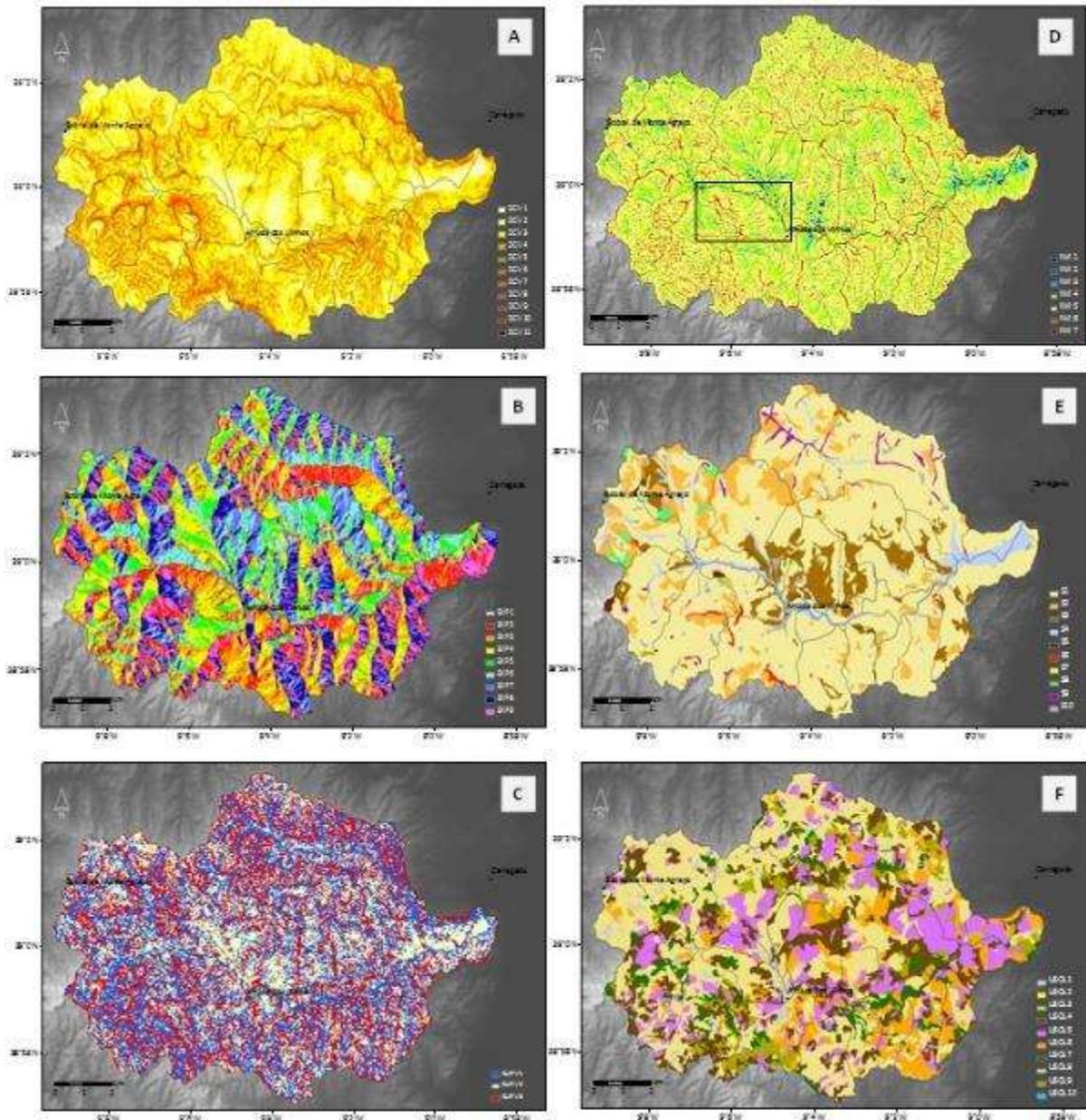


Figura 4 – Factores de predisposición para la ocurrencia de movimientos de ladera, utilizados en la cuenca del Río Grande da Pipa: A) Pendiente (DCV); B) Exposición (EXP); C) Curvatura (CURV); D) Índice Inverso de Humedad (IWI); E) Suelos (SOLO); y F) Uso y ocupación del suelo (USOL).

### 2.3. MÉTODO ESTADÍSTICO - VALOR INFORMATIVO (VI)

El método estadístico del Valor Informativo bivariado y con apoyo bayesiano (Yin y Yan, 1988; Yan, 1988; Zêzere, 2002) se ha aplicado con éxito en la zona de estudio y en la región al norte de Lisboa para evaluar la susceptibilidad a los movimientos de ladera (Oliveira *et al.*, 2009; 2015, 2017; Zêzere *et al.*, 2017).

El método del Valor Informativo (VI) describe cuantitativamente la relación entre cada clase de cada variable independiente (variable  $X_i$ ) y un conjunto de movimientos de pendiente en forma de puntuación, obtenida por la Ecuación 1 (Eq. 1).

$$I_i = \ln \frac{S_i/N_i}{S/N} \quad (\text{Eq. 1})$$

Donde:  $S_i$  es el número de Unidades de Terreno (UT) con movimientos de ladera y presencia de la variable  $X_i$ ;  $N_i$  es el número de UT en cada variable  $X_i$ ;  $S$  es el número de UT con movimientos de ladera en el área de estudio; y  $N$  es el número total de UT del área de estudio.

El valor final de la susceptibilidad se determina para cada UT (píxel) mediante la suma del VI obtenido para cada una de las variables ( $I_i$ ) utilizadas como factor de predisposición (Ecuación 2).

$$I_j = \sum_{i=1}^m X_{ij} I_i \quad (\text{Eq. 2})$$

Donde:  $m$  es el número de variables; y  $X_{ij}$  es 1 o 0 dependiendo de si la variable está presente o ausente en la UT, respectivamente.

El método VI permite cuantificar la susceptibilidad mediante una puntuación incluso en zonas (unidades de terreno) aún no inestables (Zêzere, 2002).

Este método bivariado, de apoyo bayesiano, se basa en la transformación logarítmica del cociente entre la probabilidad condicional de encontrar un movimiento de ladera en una determinada clase de una variable (factor de predisposición) y la probabilidad a priori de encontrar un movimiento de ladera en toda la zona de estudio (por ejemplo, Zêzere, 2010).

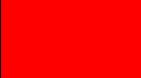
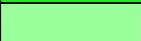
A pesar de su base bayesiana, los resultados finales no expresan un valor de probabilidad (0-1), sino el posicionamiento de la variable (clase), o UT, en relación con la densidad media. La variable es tanto más importante para los movimientos condicionantes cuanto mayor sea su distancia al valor cero ( $\ln 1$ ). Un valor nulo indica que la variable en cuestión tiene una densidad de movimiento idéntica a la densidad media registrada en la zona estudiada, por lo que su relación con la inestabilidad no es concluyente. Las variables que tienen una densidad superior a la media, lo que indica una mayor posibilidad de ocurrencia de movimientos, tienen puntuaciones VI positivas, mientras que lo contrario ocurre con las variables con una densidad inferior a la media, que, por tanto, tendrán puntuaciones con signo negativo. La misma interpretación debe hacerse para el VI de la unidad de terreno, donde el signo positivo indica la propensión a la ocurrencia de movimientos de ladera, tanto más cuanto mayor sea el valor de la puntuación. Los valores negativos de VI caracterizan las zonas menos susceptibles a la inestabilidad de los taludes (e.g., Garcia, 2012).

## 2.4. CLASIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE SUSCEPTIBILIDAD

Para la clasificación de los mapas de susceptibilidad se definieron los límites de las clases de manera que la clase de mayor susceptibilidad tenga la superficie necesaria para validar al menos el 70% del área de deslizamiento, cumpliendo con los criterios establecidos en los lineamientos para la delimitación de la figura de "Áreas de Inestabilidad de Laderas" de la Reserva Ecológica Nacional (REN). En la Tabla 1 se expresan los límites que caracterizan las cinco clases de susceptibilidad que se adoptarán en este trabajo, la capacidad de predicción de cada clase y la forma de representación cromática. La designación está en consonancia con algunas propuestas expresadas en la literatura (e.g., Baeza e Corominas, 2001).

Los valores propuestos también están de acuerdo con la progresión en términos de tamaño de clase observada en algunos trabajos de referencia (por ejemplo, Blahut *et al.*, 2010), cuyos límites de clase se definen en el 75%, 85%, 95% y 99%).

*Tabla 1 – Clases de susceptibilidad a los movimientos de ladera, caracterización de la capacidad de predicción de cada clase y forma de representación cromática adoptada para la cuenca del Río Grande da Pipa*

Código da classe	Designação	% Acumulada de área deslizada	Capacidade preditiva da classe (%)	Cor
I	Muito Elevada	0-70	70	
II	Elevada	70-85	15	
III	Moderada	85-95	10	
IV	Baixa	95-99	4	
V	Muito Baixa	99-100	1	

La evaluación de los mapas de susceptibilidad se realiza mediante el cálculo gráfico de las curvas de éxito/predicción (por ejemplo, Chung y Fabbri, 1999; 2003; 2005), donde se demuestra gráficamente en términos porcentuales, o en una escala que va de 0 a 1. En el eje de abscisas se define el área de estudio clasificada por orden decreciente de susceptibilidad y en el eje de ordenadas una función de distribución acumulativa del área de deslizamiento. Para la elaboración de las curvas de éxito (ajuste del modelo), el mapa de susceptibilidad se cruza con los mismos movimientos de pendiente que se utilizaron para entrenar el modelo de susceptibilidad. Para la elaboración de las curvas de predicción (evaluación de la capacidad de predicción) se cruza el mapa de susceptibilidad con los movimientos de pendiente que no se utilizaron para entrenar el modelo.

La determinación del área bajo cada curva de éxito/predicción, en adelante denominada Área Bajo la Curva - AAC, permite evaluar cuantitativamente la capacidad global de ajuste/predicción de cada modelo de susceptibilidad (por ejemplo, Bi y Bennett, 2003; Beguería, 2006; Zêzere, 2010) y varía en una escala entre 0 y 1. Cuanto más se acerque el valor de AAC a 1, mayor será la capacidad de predicción del modelo. Los valores inferiores a 0,5 muestran modelos con peor capacidad de ajuste/predicción que el aleatorio, por lo que no deben considerarse (Bi y Bennett, 2003; Beguería, 2006).

La expresión matemática del AAC viene dada por la ecuación 3 (e.g., Garcia *et al.*, 2007).

$$AAC = \sum_{i=1}^n \left[ (L_{Si} - L_i) * \frac{a_i + b_i}{2} \right] \quad (\text{Eq. 3})$$

Donde,  $L_{Si} - L_i$  es la amplitud de cada clase;  $a_i$  es el valor de la ordenada correspondiente a  $L_i$ ; y  $b_i$  es el valor de la ordenada correspondiente a  $L_{Si}$ .

### 3. RESULTADOS - SUSCEPTIBILIDAD A LOS MOVIMIENTOS DE LADERA

A partir del análisis sensible realizado al número de factores predisponentes ideales para la evaluación de la susceptibilidad al movimiento de ladera en el área de estudio, Oliveira (2012) concluyó que el uso de los siete factores predisponentes considerados en este trabajo, permite aumentar la capacidad predictiva de los mapas de susceptibilidad al movimiento de ladera. El autor también concluye que cuando no es así, el aumento del número de factores de predicción por encima de los estrictamente necesarios (entre 1 y 7 factores) no provoca una entropía que justifique la necesidad de excluirlos.

#### 3.1 SUSCEPTIBILIDAD A LOS MOVIMIENTOS DE LADERA - AJUSTE DEL MODELO

Aplicando la Ecuación 1, se determinaron los puntajes de VI para cada clase de cada una de las siete variables independientes consideradas como factores predisponentes para la ocurrencia de cada uno de los diferentes tipos de movimiento de ladera inventariados en la cuenca del Río Grande da Pipa (Tabla 2).

En la Fig. 5 se presentan los mapas de susceptibilidad clasificados para cada uno de los tipos de movimiento de ladera, elaborados con la totalidad de los 7 factores de predisposición y la aplicación de las Eq. 1 y 2. A partir del análisis se puede comprobar que los diferentes tipos de movimientos de ladera tienen diferentes patrones de distribución espacial, que se reflejan en diferentes zonificaciones de susceptibilidad.

Tabla 2 – Scores del valor informativo (VI), por tipo de movimiento y por clase de factor predisponente.

	<b>ITotal</b>	<b>R</b>	<b>RS</b>	<b>RSA</b>	<b>TS</b>	<b>TSA</b>
<b>CURV 1</b>	0,17639	0,1764	0,1864	-0,0636	0,2904	0,1657
<b>CURV 2</b>	0,05546	0,0555	-0,1152	0,1107	-0,6263	-0,1872
<b>CURV 3</b>	-0,31457	-0,3146	-0,1143	-0,0580	0,1172	-0,0161
<b>EXP 1</b>	-2,84357	-2,8436	-2,3890	-1,8296	<b>-4,0295</b>	<b>-3,9793</b>
<b>EXP 2</b>	-0,07455	-0,0745	0,7761	0,2215	0,2560	-0,5015
<b>EXP 3</b>	0,14473	0,1447	0,5933	0,2508	0,2593	0,8717
<b>EXP 4</b>	0,11501	0,1150	0,0944	-0,1509	0,5785	0,2612
<b>EXP 5</b>	0,12535	0,1254	-1,0559	-0,1671	-0,6380	-0,2248
<b>EXP 6</b>	0,36991	0,3699	-0,8565	-0,6172	-1,2490	-1,0551
<b>EXP 7</b>	0,10696	0,1070	-0,4733	-0,7751	-0,2887	-0,4463
<b>EXP 8</b>	-0,53649	-0,5365	-0,3256	0,3903	-0,0566	-0,2643
<b>EXP 9</b>	-0,80285	-0,8028	-0,3671	0,3020	-0,2036	-0,2686
<b>DCV 1</b>	-3,11515	-3,1152	-2,3851	-2,6131	-3,5924	-2,4735
<b>DCV 2</b>	-2,37551	-2,3755	-2,1791	-1,7643	-3,2545	-2,7888
<b>DCV 3</b>	-0,10357	-0,1036	-0,4227	-0,4026	-2,7535	-1,1360
<b>DCV 4</b>	0,48809	0,4881	0,4817	0,6181	0,1083	0,2344
<b>DCV 5</b>	0,55433	0,5543	0,9062	0,7234	1,1076	0,7364
<b>DCV 6</b>	0,54832	0,5483	1,0206	0,9408	1,8454	1,5130
<b>DCV 7</b>	0,64725	0,6472	1,0119	0,6905	2,2907	2,3543
<b>DCV 8</b>	0,86663	0,8666	1,1982	0,3763	2,8684	2,8409
<b>DCV 9</b>	1,09187	1,0919	1,3988	0,2981	3,0324	2,3836
<b>DCV 10</b>	1,23217	1,2322	1,0308	-0,2730	2,2442	1,0341
<b>DCV 11</b>	1,26107	1,2611	0,0041	<b>-3,6149</b>	1,3759	<b>-3,9793</b>
<b>ULIT 1</b>	-2,30256	-2,3026	-1,0101	-3,6148	-2,3969	<b>-3,9793</b>
<b>ULIT 2</b>	<b>-5,02720</b>	<b>-5,0272</b>	<b>-2,5520</b>	<b>-3,6149</b>	<b>-4,0295</b>	<b>-3,9793</b>
<b>ULIT 3</b>	<b>-5,02720</b>	<b>-5,0272</b>	<b>-2,5520</b>	<b>-3,6149</b>	<b>-4,0295</b>	<b>-3,9793</b>
<b>ULIT 4</b>	<b>-5,02720</b>	<b>-5,0272</b>	<b>-2,5520</b>	<b>-3,6149</b>	<b>-4,0295</b>	<b>-3,9793</b>
<b>ULIT 5</b>	-1,21195	-1,2120	0,3377	-0,2203	0,3105	0,7684
<b>ULIT 6</b>	-1,70837	-1,7084	-0,5190	0,0799	-0,1219	-0,3701
<b>ULIT 7</b>	-0,12830	-0,1283	-0,4108	-0,7504	0,7007	0,8844
<b>ULIT 8</b>	-0,00801	-0,0080	-1,6304	<b>-3,6149</b>	<b>-4,0295</b>	-0,9108
<b>ULIT 9</b>	<b>-5,02720</b>	<b>-5,0272</b>	<b>-2,5520</b>	<b>-3,6149</b>	<b>-4,0295</b>	<b>-3,9793</b>
<b>ULIT 10</b>	0,32717	0,3272	0,1766	0,1864	-0,2460	-0,4328
<b>ULIT 11</b>	-0,39092	-0,3909	0,9854	0,1009	-1,1016	-2,2163

Tabla 2 (continuación) – Scores del valor informativo (VI), por tipo de movimiento y por clase de factor predisponente.

	<b>ITotal</b>	<b>R</b>	<b>RS</b>	<b>RSA</b>	<b>TS</b>	<b>TSA</b>
<b>SOLO1</b>	0,23275	0,2328	0,1496	0,2099	0,0555	-0,1435
<b>SOLO 2</b>	-0,76394	-0,7639	-0,4412	-2,3897	-0,2067	-1,3703
<b>SOLO 3</b>	-1,43319	-1,4332	-0,2931	-0,4157	-2,1117	-0,9726
<b>SOLO 4</b>	-1,84211	-1,8421	-1,6105	-0,8255	-1,6000	-1,9162
<b>SOLO 5</b>	-1,74476	-1,7448	1,4156	-1,7836	-0,5657	<b>-3,9793</b>
<b>SOLO 6</b>	1,00021	1,0002	0,0757	1,0679	3,0316	3,6797
<b>SOLO 7</b>	<b>-5,02720</b>	<b>-5,0272</b>	<b>-2,5520</b>	<b>-3,6149</b>	<b>-4,0295</b>	<b>-3,9793</b>
<b>SOLO 8</b>	-5,02708	-5,0271	<b>-2,5520</b>	<b>-3,6149</b>	<b>-4,0295</b>	<b>-3,9793</b>
<b>SOLO 9</b>	-1,84532	-1,8453	0,0260	-0,0399	0,9586	-2,0470
<b>SOLO 10</b>	-1,52344	-1,5234	-1,6582	-0,7814	-4,0294	1,3541
<b>USOL 1</b>	-1,33862	-1,3386	-2,5519	0,6234	-2,0839	-0,2720
<b>USOL 2</b>	1,42144	1,4214	<b>-2,5520</b>	<b>-3,6149</b>	<b>-4,0295</b>	6,2922
<b>USOL 3</b>	<b>-5,02720</b>	<b>-5,0272</b>	<b>-2,5520</b>	<b>-3,6149</b>	<b>-4,0295</b>	<b>-3,9793</b>
<b>USOL 4</b>	-0,07412	-0,0741	0,0568	-0,3157	0,1461	-0,1314
<b>USOL 5</b>	0,02128	0,0213	0,1488	-0,2892	-0,5252	-0,4287
<b>USOL 6</b>	-0,25659	-0,2566	0,1727	-0,0802	-0,5856	-1,0836
<b>USOL 7</b>	-0,00701	-0,0070	0,5319	-0,4072	0,9619	-0,9172
<b>USOL 8</b>	-0,03881	-0,0388	-0,3409	0,2782	-0,3098	-0,3532
<b>USOL 9</b>	0,78038	0,7804	0,5105	-0,7898	1,1334	1,1926
<b>USOL 10</b>	<b>-5,02720</b>	<b>-5,0272</b>	-1,7509	<b>-3,6149</b>	<b>-4,0295</b>	<b>-3,9793</b>
<b>IWI 1</b>	-2,01511	-2,0151	-0,9974	-1,2586	-1,2570	-1,2732
<b>IWI 2</b>	-2,12005	-2,1201	-0,9550	-1,8747	-1,0623	<b>-3,9793</b>
<b>IWI 3</b>	-0,34041	-0,3404	-1,2349	-1,3255	-1,2550	-3,9792
<b>IWI 4</b>	0,26110	0,2611	-0,1884	-0,2795	-1,2833	-1,2994
<b>IWI 5</b>	-0,04193	-0,0419	0,1414	0,1424	0,1075	0,1775
<b>IWI 6</b>	-0,25337	-0,2534	-0,0979	0,1426	0,9966	0,8519
<b>IWI 7</b>	0,13793	0,1379	-0,3704	<b>-3,6149</b>	1,5246	<b>-3,9793</b>

NOTA: los valores en rojo representan las clases de cada variable independiente en las que no hay movimientos de pendiente de tipo (y) y en las que no fue posible determinar el valor de VI. Los scores VI para estos casos se definió por un valor una milésima por debajo del valor mínimo encontrado para este tipo de movimiento de ladera, considerando todos los factores de predisposición.

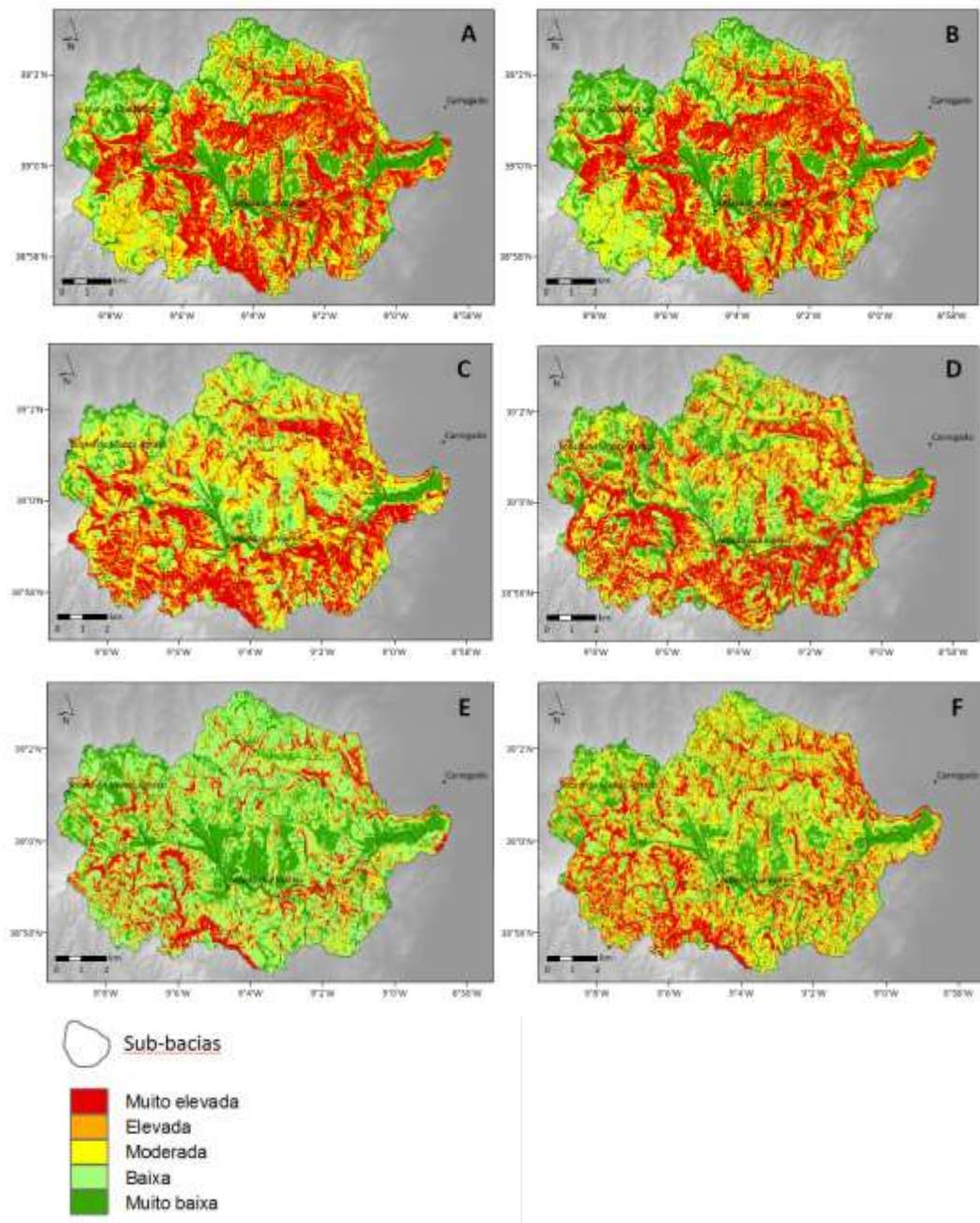


Figura 5 – Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera en la cuenca del Rio Grande da Pipa. A) Todos los movimientos del talud; B) Deslizamiento rotacional profundo (R); C) Deslizamiento rotacional superficial (RS); D) Deslizamiento superficial rotacional en talud artificial (RSA); E) Deslizamiento superficial traslacional (TS); F) Deslizamiento superficial traslacional en talud artificial (TSA).

El padrón espacial de los deslizamientos rotacionales profundos (Fig. 5B), así como el correspondiente a los movimientos globales

(Fig. 5A), se configura en laderas talladas en el complejo de margas y arcillas. Los deslizamientos rotacionales poco profundos (RS y RSA) son más probables en las laderas expuestas aproximadamente al cuadrante norte y, en el caso del sector SE de la cuenca RGP, también en las laderas expuestas al W y al E (Figs. 5C, 5D). Los restantes tipos de movimientos (TS y TSA) están más relacionados con las zonas de maior pendiente, es decir, las caracterizadas por la proximidad de las cornisas talladas en las calizas coralinas (Fig. 5E, 5F).

Como resultado de los procedimientos de validación, es decir, del cruce de cada uno de los mapas de susceptibilidad representados en la Fig. 5 con los respectivos inventarios de movimientos de ladera separados según el tipo de movimiento de ladera (Fig. 2), es posible representar gráficamente las curvas de éxito (Fig. 6) y determinar, aplicando la Eq. 3, la respectiva AAC (Tabla 3).

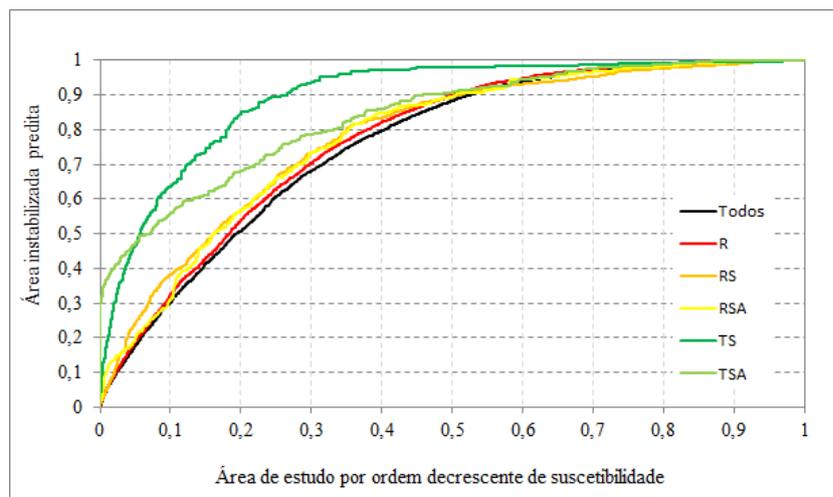


Figura 6 - Curvas de éxito de cada uno de los modelos de susceptibilidad por tipo de movimiento de ladera, en la cuenca del Rio Grande da Pipa.

Tabela 3 – Valores de AAC para cada uno de los modelos de susceptibilidad, por tipo de movimiento de ladera, en la cuenca del Rio Grande da Pipa.

	Todos	R	RS	RSA	TS	TSA
AAC	0,761	0,773	0,781	0,781	0,896	0,839

Los modelos de susceptibilidad elaborados para la zona de estudio presentan un ajuste entre aceptable y muy bueno en relación con los inventarios de movimientos de ladera que les dieron origen, evidenciado por la variación de los valores de AAC entre 0,761 y 0,896. El modelo correspondiente a este último valor de AAC es el que mejor se ajusta, lo que se explica en este caso por el control que tienen las zonas más empinadas sobre la ocurrencia de desprendimientos superficiales traslacionales. Una lectura similar puede asociarse a la ocurrencia de deslizamientos traslacionales asociados a taludes artificiales (TSA), como las zonas de pendiente asociadas a los terraplenes / excavaciones realizadas durante la construcción de carreteras. En el caso de los modelos desarrollados para los deslizamientos rotacionales, predominantes en la zona de estudio, los modelos muestran valores más bajos y muy similares, lo que refleja la mayor complejidad de las condiciones que se asocian a ellos y el mayor control litológico. En este caso, el hecho de que en la zona de estudio la ULIT 10, compuesta principalmente por margas y arcillas, ocupe casi el 60% de la zona de estudio, contribuye a disminuir la capacidad de los inventarios para ajustarse a los mapas de susceptibilidad.

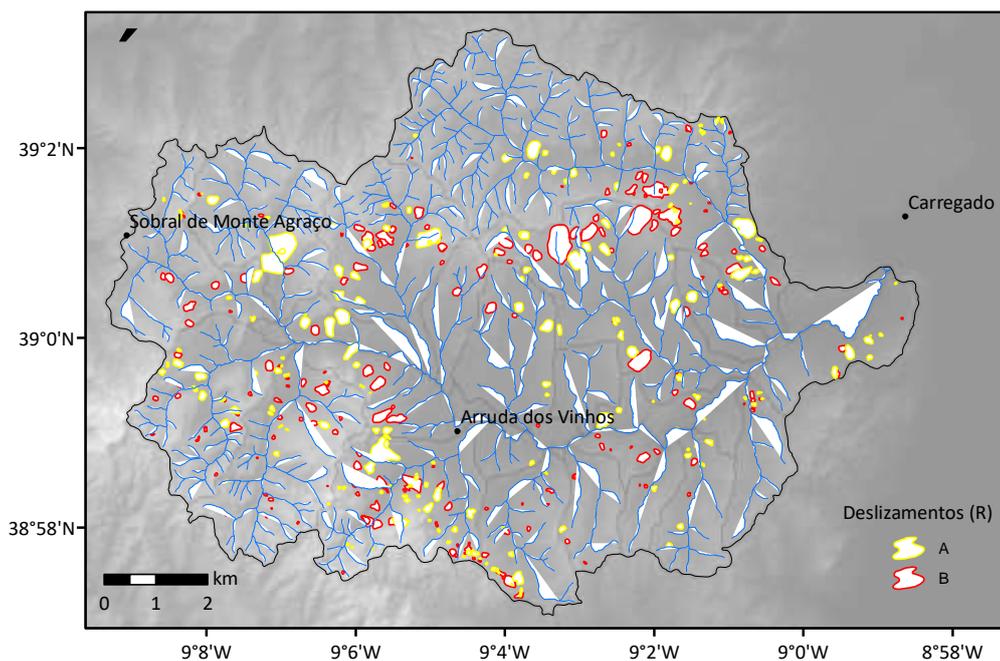
### **3.2 SUSCEPTIBILIDAD A LOS MOVIMIENTOS DE LADERA - EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE PREDICCIÓN**

La evaluación de la capacidad de predicción de los modelos de susceptibilidad a diferentes tipos de movimientos de ladera se realizó a partir de la partición aleatoria de los inventarios. Para ello, cada inventario de movimientos de pendiente se dividió en dos grupos con el mismo peso (número de movimientos de pendiente), aproximadamente el 50% de los movimientos en el grupo A y el 50% restante en el grupo B. Estos grupos se utilizaron, alternativamente, como grupo de entrenamiento y grupo de validación para los modelos de susceptibilidad.

En total, se crearon 12 modelos de susceptibilidad, 2 para cada uno de los 6 tipos de inventario predefinidos en la sección anterior,

utilizando el grupo A y el grupo B para entrenar los modelos de susceptibilidad. En la validación también se consideraron las particiones A/B de los inventarios de movimientos de ladera, por lo que se definieron para cada modelo las respectivas tasas de éxito (validación realizada con el grupo de movimientos utilizados para entrenar el modelo de susceptibilidad) y de predicción (validación realizada con el grupo de movimientos no utilizados para entrenar el modelo de susceptibilidad).

En la Fig. 7 se ilustra la partición aleatoria del inventario de desprendimientos profundos (R) en el grupo A y el grupo B. El cuadro 4 resume las principales características de los principales inventarios de movimientos de ladera utilizados.



*Figura 7 – Repartición aleatoria del inventario de deslizamientos rotacionais profundos (R) en el grupo A y el grupo B sobre una base de 50-50%.*

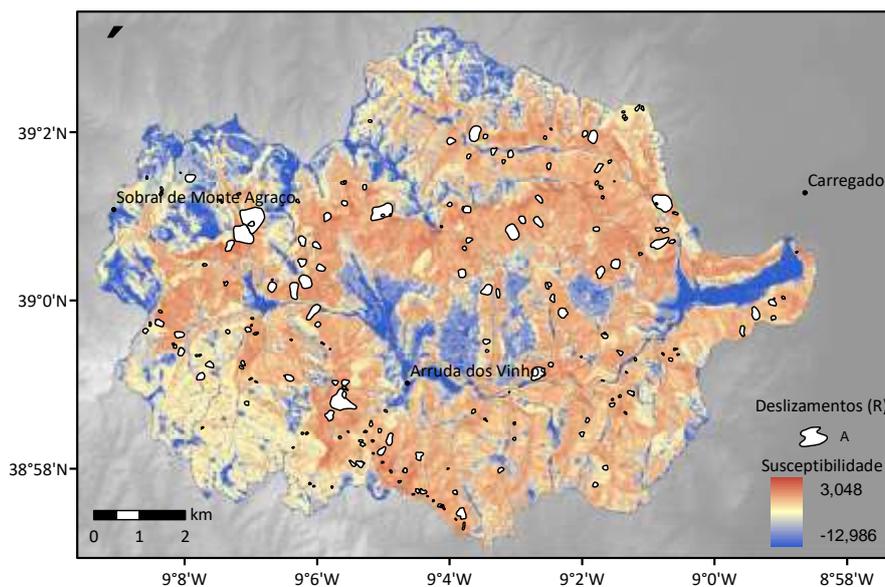
*Tabla 4 – Datos relativos a los inventarios de movimientos de ladera obtenidos por partición aleatoria (Grupo A y Grupo B) del inventario total*

	# Total de movimientos	GRUPO A				GRUPO B			
		# Mov.	Amv (matricial)			# Mov.	Amv (matricial)		
			# Células	Área (m <sup>2</sup> )	Área (%)		# Células	Área (m <sup>2</sup> )	Área (%)
Todos	1434	717	128473	3211825	2,90	717	121530	3038250	2,75
R	424	212	108663	2716575	2,46	212	115110	2877750	2,60
RS	382	191	8637	215925	0,20	191	10229	255725	0,23
TS	169	84	1119	27975	0,03	85	992	24800	0,02

Nota: La suma de las partes no tiene por qué ser igual al total, ya que el recubrimiento espacial de algunos movimientos influye en la conversión del área inestable al formato matricial. Mov.= Movimientos de ladera.

La tabla 5 presenta los *scores* VI por clase de cada factor de predisposición para la aparición de cada uno de los diferentes tipos de movimiento de ladera, considerando la partición aleatoria de los inventarios.

En la Fig. 8 y 9 se presentan, a modo de ejemplo, los mapas de susceptibilidad no clasificados a los deslizamientos rotacionales profundos (R) basados en las particiones aleatorias A y B del inventario, respectivamente.



*Figura 8 – Mapa de susceptibilidad a los deslizamientos profundos (R) obtenido a partir de la partición A, en la cuenca del Rio Grande da Pipa.*

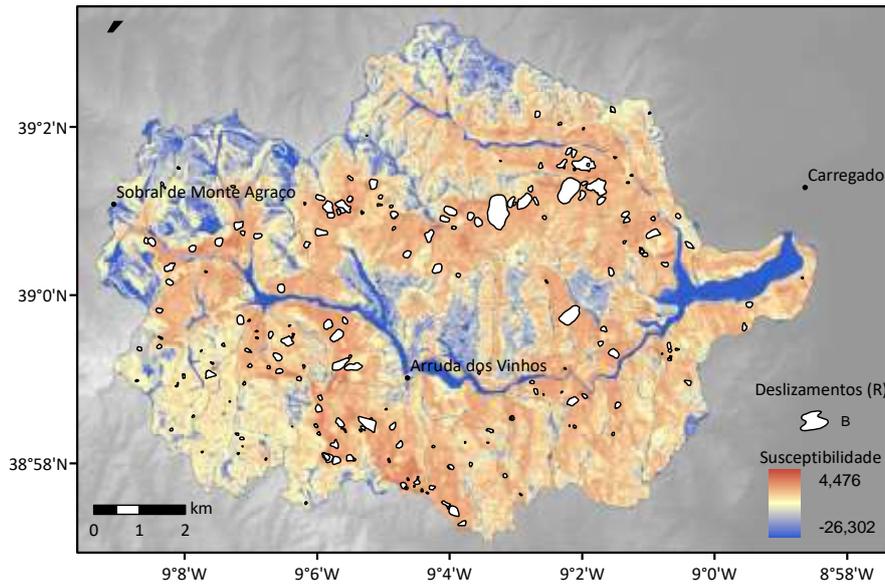


Figura 9 – Mapa de susceptibilidad a los deslizamientos profundos (R) obtenido a partir de la partición B, en la cuenca del Rio Grande da Pipa.

*Tabla 5 – Scores del Valor Informativo (VI) para los dos grupos de movimientos de ladera definidos al azar (A y B), por tipología de movimiento y factor de predisposición.*

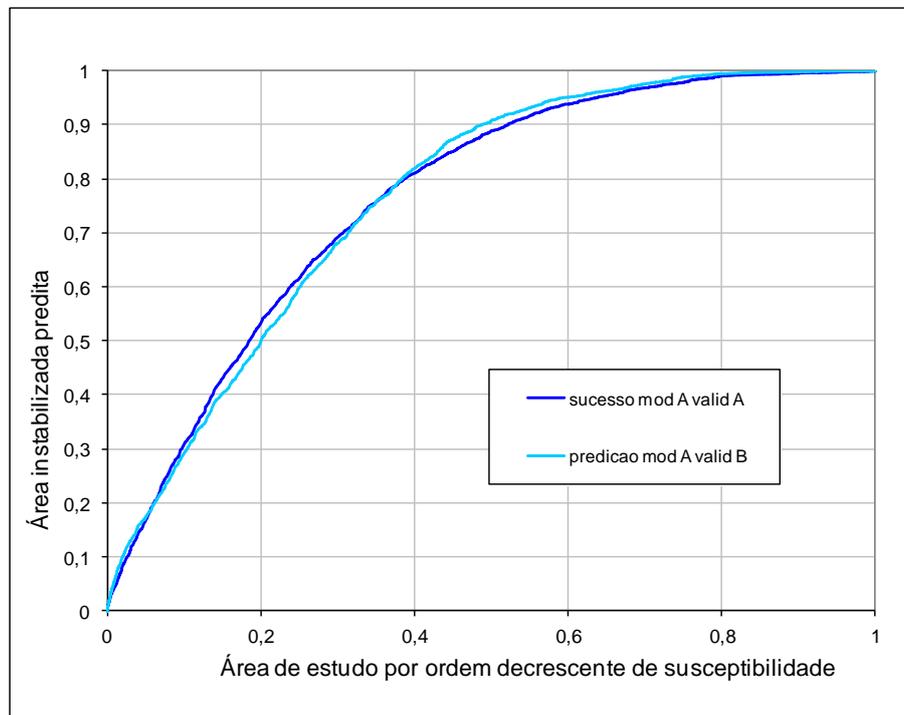
Variável	ITotal		R		RS		RSA		TS		TSA	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
<b>CURV 1</b>	0.16	0.1883	0.1807	0.1745	0.0129	0.3019	-0.12	-0.0257	0.3061	0.2683	0.2168	0.2163
<b>CURV 2</b>	0.0435	0.0343	0.0654	0.0504	-0.0304	-0.1674	0.2138	0.0292	-0.6351	-0.6206	-0.1748	-0.146
<b>CURV 3</b>	-0.2686	-0.304	-0.3378	-0.3034	0.0173	-0.2494	-0.1374	-0.0037	0.101	0.1423	-0.0988	-0.1272
<b>EXP 1</b>	-2.4031	-3.568	-2.2033	-5.0178	-2.7157	-2.1917	-1.0129	<b>-3.0385</b>	<b>-3.3966</b>	<b>-5.1403</b>	<b>-3.2350</b>	<b>-3.5626</b>
<b>EXP 2</b>	-0.064	0.1313	-0.3323	0.1521	0.9214	0.6528	0.5314	-0.1169	0.5391	-0.2112	-0.2291	-1.0292
<b>EXP 3</b>	0.1356	0.2548	-0.0943	0.3198	0.3409	0.7526	0.2425	0.2505	0.4011	0.0659	0.8928	1.1505
<b>EXP 4</b>	0.1186	0.1131	0.2062	0.0676	0.2162	-0.0257	-0.7772	0.1601	0.6666	0.4643	0.0801	0.2163
<b>EXP 5</b>	0.1366	-0.0269	0.1024	0.1125	-1.0761	-1.0562	-0.449	0.0038	-1.5312	-0.1298	-0.1428	-0.487
<b>EXP 6</b>	0.4516	0.1181	0.3247	0.3981	-0.8411	-0.8873	-1.9837	-0.1603	-1.4197	-1.0895	-0.5667	-2.0931
<b>EXP 7</b>	0.1497	-0.0667	0.2515	-0.0923	-0.3449	-0.6159	-0.6591	-0.8844	0.0139	-0.8039	-0.7927	-0.4058
<b>EXP 8</b>	-0.8112	-0.2578	-0.2093	-0.9761	-0.3702	-0.3007	0.4219	0.3621	-0.6955	0.3677	-0.2406	-0.4808
<b>EXP 9</b>	-0.9078	-0.5703	-0.7439	-0.854	-0.5195	-0.1997	0.7059	-0.1548	-0.7494	0.2132	-0.3488	-0.382
<b>DCV 1</b>	-2.6922	-3.6399	-3.081	-3.1863	-2.3176	-2.4643	-2.3841	-2.8476	-2.9595	<b>-5.1403</b>	<b>-3.2350</b>	-2.0235
<b>DCV 2</b>	-2.0727	-2.8534	-2.5041	-2.3008	-2.3276	-2.0844	-2.3629	-1.4662	-2.6957	-5.1402	-2.3929	-3.5625
<b>DCV 3</b>	-0.0971	-0.1916	-0.0567	-0.1668	-0.3315	-0.4893	-0.3092	-0.4873	-2.3795	-3.4783	-1.0534	-1.4116
<b>DCV 4</b>	0.4677	0.5065	0.3901	0.5791	0.5079	0.4605	0.4667	0.7297	-0.1373	0.3248	0.2134	0.133
<b>DCV 5</b>	0.5371	0.6561	0.5831	0.5386	0.7861	0.9827	0.9685	0.4683	1.0602	1.1548	0.8814	0.5096
<b>DCV 6</b>	0.618	0.6528	0.6451	0.4692	0.9277	1.0802	1.2009	0.666	1.9495	1.7087	1.3650	1.7089
<b>DCV 7</b>	0.6114	0.8548	0.803	0.4997	0.9258	1.0732	0.4552	0.8374	2.4115	2.1295	2.2258	2.614

DCV 8	0.8117	1.1187	1.0165	0.7396	1.0814	1.28	-2.3842	0.9527	2.8816	2.8853	2.8863	2.9937
DCV 9	1.0833	1.2841	1.2767	0.9542	1.3312	1.436	-2.3842	0.8745	3.1838	2.8237	2.4549	2.5527
DCV 10	0.9398	1.4901	1.4187	1.033	0.7381	1.2107	-2.3842	0.3033	2.0885	2.3913	-3.2350	1.4841
DCV 11	0.9031	1.4642	1.3145	1.2255	0.3706	-0.4917	-2.3842	-3.0385	1.7211	0.7429	-3.2350	-3.5626
ULIT 1	-1.9482	-2.3743	-1.6008	-5.0179	-1.3948	-0.785	-2.3842	-3.0384	-1.7641	-5.1403	-3.2350	-3.5626
ULIT 2	-4.1827	-4.5326	-3.0811	-5.0179	-2.7158	-2.7702	-2.3842	-3.0385	-3.3966	-5.1403	-3.2350	-3.5626
ULIT 3	-4.1827	-4.5326	-3.0811	-5.0179	-2.7158	-2.7702	-2.3842	-3.0385	-3.3966	-5.1403	-3.2350	-3.5626
ULIT 4	-4.1827	-4.5326	-3.0811	-5.0179	-2.7158	-2.7702	-2.3842	-3.0385	-3.3966	-5.1403	-3.2350	-3.5626
ULIT 5	-1.0649	-0.579	-1.1336	-1.3359	-0.3042	0.679	-0.192	-0.25	-0.2974	0.7225	1.2249	-0.1096
ULIT 6	-1.6631	-1.2894	-1.3555	-2.2228	-0.4679	-0.5803	-0.0502	0.1654	-0.1025	-0.1485	-0.4958	-0.4631
ULIT 7	-0.2524	-0.0276	0.0851	-0.3617	-0.6321	-0.2675	-0.7643	-0.7462	0.9861	0.2282	0.5539	1.2764
ULIT 8	-0.497	0.3463	0.4328	-0.3872	-0.8585	-2.7702	-2.3842	-3.0385	-3.3966	-5.1403	-0.1666	-3.5626
ULIT 9	-4.1827	-4.5326	-3.0811	-5.0179	-2.7158	-2.7702	-2.3842	-3.0385	-3.3966	-5.1403	-3.2350	-3.5626
ULIT 10	0.3426	0.265	0.2599	0.3842	0.2345	0.1293	0.2142	0.167	-0.4339	-0.0653	-0.3112	-0.7483
ULIT 11	-0.316	-0.0954	-0.6019	-0.2521	1.6961	-1.2346	0.4068	-0.239	-0.4687	-5.1403	-3.2350	-1.7663
SOLO1	0.2248	0.2248	0.2376	0.2291	0.1192	0.1761	0.2444	0.1828	-0.0036	0.1143	0.0163	-0.4384
SOLO 2	-0.6524	-0.7935	-0.9132	-0.6232	-0.4295	-0.445	-1.9784	-2.9119	-0.2409	-0.1308	-1.2546	-1.6824
SOLO 3	-1.4768	-1.1015	-1.3047	-1.6183	-0.0869	-0.5296	-0.2844	-0.5402	-1.6901	-3.0166	-1.2500	-0.9689
SOLO 4	-1.4079	-2.6024	-1.1714	-4.6843	-1.6385	-1.6044	-2.3842	-0.2491	-2.0658	-1.2521	-1.5287	-2.6702
SOLO 5	-0.5069	-1.1241	-1.8937	-1.6576	2.1876	-2.7702	-2.3842	-1.2072	-3.3966	0.1876	-3.2350	-3.5626
SOLO 6	1.0054	0.9865	0.553	1.2632	0.1545	-0.0147	-2.3842	1.6443	3.2197	2.7604	3.5193	4.103
SOLO 7	-4.1827	-4.5326	-3.0811	-5.0179	-2.7158	-2.7702	-2.3842	-3.0385	-3.3966	-5.1403	-3.2350	-3.5626
SOLO 8	-4.1826	-4.5325	-3.0811	-4.3829	-2.7158	-2.7702	-2.3842	-3.0385	-3.3966	-5.1403	-3.2350	-3.5626

<b>SOLO 9</b>	-2.0595	-1.1397	-1.2987	-3.1411	-0.7089	0.3782	-1.2156	0.3898	1.5914	<b>-5.1403</b>	<b>-3.2350</b>	-1.597
<b>SOLO 10</b>	-2.1409	-1.145	-1.9709	-1.2603	-1.2206	-2.3135	-1.0293	-0.6278	-3.3965	<b>-5.1403</b>	0.1219	1.7859
<b>USOL 1</b>	-1.7823	-1.0302	-1.5234	-1.2256	-2.3597	-2.7701	1.1168	-0.0864	-2.5497	-1.7361	-0.4322	-0.3407
<b>USOL 2</b>	0.6357	1.9729	<b>-3.0811</b>	2.0656	<b>-2.7158</b>	<b>-2.7702</b>	<b>-2.3842</b>	<b>-3.0385</b>	<b>-3.3966</b>	<b>-5.1403</b>	5.4306	6.7422
<b>USOL 3</b>	<b>-4.1827</b>	<b>-4.5326</b>	<b>-3.0811</b>	<b>-5.0179</b>	<b>-2.7158</b>	<b>-2.7702</b>	<b>-2.3842</b>	<b>-3.0385</b>	<b>-3.3966</b>	<b>-5.1403</b>	<b>-3.2350</b>	<b>-3.5626</b>
<b>USOL 4</b>	-0.0548	-0.0416	0.0595	-0.1857	0.2112	-0.1042	0.0225	-0.6969	0.1534	0.1337	-0.0093	-0.451
<b>USOL 5</b>	-0.192	0.2073	0.1912	-0.2006	0.1662	0.1629	-0.5678	-0.1199	-0.481	-0.5817	-0.3192	-0.7338
<b>USOL 6</b>	-0.2382	-0.1777	-0.1888	-0.3263	0.3252	0.0415	0.381	-0.7104	-0.174	-1.4491	-1.7099	-0.9055
<b>USOL 7</b>	0.0153	0.049	-0.0812	0.0399	-0.1275	0.8615	-0.3482	-0.4633	1.0063	0.9315	-0.5406	-1.6458
<b>USOL 8</b>	0.0563	-0.2144	-0.1166	0.0226	-0.3702	-0.3295	0.0281	0.4429	-0.5742	-0.0803	-0.0712	-0.8786
<b>USOL 9</b>	0.7453	0.8025	0.569	0.9715	0.5279	0.4818	-1.1969	-0.5618	1.2359	0.9991	1.1496	1.5452
<b>USOL 10</b>	<b>-4.1827</b>	<b>-3.6231</b>	<b>-3.0811</b>	<b>-5.0179</b>	<b>-0.9789</b>	<b>-2.7702</b>	<b>-2.3842</b>	<b>-3.0385</b>	<b>-3.3966</b>	<b>-5.1403</b>	<b>-3.2350</b>	<b>-3.5626</b>
<b>IWI 1</b>	-1.589	-2.2854	-1.5111	-3.0744	-0.9186	-1.0878	-0.6931	-2.1862	-1.0942	-1.4846	-1.6276	-1.2286
<b>IWI 2</b>	-1.9098	-2.0204	-2.0608	-2.2223	-0.8389	-1.0841	<b>-2.3842</b>	-1.2983	-0.7171	-1.6953	<b>-3.2350</b>	<b>-3.5626</b>
<b>IWI 3</b>	-0.2041	-0.7158	-0.3724	-0.3393	-1.1076	-1.3763	-1.4738	-1.2287	-0.6734	-3.4974	-3.2349	<b>-3.5626</b>
<b>IWI 4</b>	0.2309	0.2056	0.318	0.1989	-0.1417	-0.2165	-0.2999	-0.2589	-0.735	-3.0423	-1.0306	-1.8213
<b>IWI 5</b>	-0.0402	-0.001	-0.0718	-0.0111	0.1254	0.1532	0.1488	0.1371	0.0072	0.2075	0.2048	0.2107
<b>IWI 6</b>	-0.1967	-0.232	-0.2949	-0.2103	-0.1155	-0.098	0.1373	0.1401	1.0017	0.999	0.6395	0.8727
<b>IWI 7</b>	0.1222	0.1778	0.0094	0.232	0.1138	-1.154	<b>-2.3842</b>	<b>-3.0385</b>	2.1574	<b>-5.1403</b>	<b>-3.2350</b>	<b>-3.5626</b>

NOTA: los valores en rojo representan las clases de cada variable en las que no hay movimientos de ladera de tipo (y) y en las que no fue posible determinar el valor de VI. Los scores de VI, para estos casos, se definió por un valor una milésima por debajo del valor mínimo encontrado para este tipo de movimiento de ladera, considerando todos los factores de predisposición.

En la Fig. 10 se presentan, a modo de ejemplo, las curvas de éxito y predicción del mapa de susceptibilidad a los deslizamientos rotacionales profundos (R), cuyo entrenamiento se realizó con la partición aleatoria A. Para la validación independiente (curva de predicción) se cruzó el mapa de susceptibilidad con la partición B.



*Figura 10 – Curvas de éxito (azul oscuro) y de predicción (azul claro) del mapa de susceptibilidad a los deslizamientos profundos (R) generado con la partición aleatoria A.*

La expresión cuantificada de la capacidad de ajuste y predicción de los diferentes mapas de susceptibilidad viene definida por los respectivos valores de AAC. En la Tabla 6 se resumen los valores de AAC, considerando el ajuste de los modelos (tasas de éxito) y su capacidad de predicción (tasas de predicción). Como era de esperar, los valores de AAC son sistemáticamente más altos cuando se evalúa el ajuste de los mapas a los datos utilizados para entrenar el modelo (tasas de éxito). La mayor exigencia de validación, cuando se cruza con un inventario independiente no utilizado para entrenar el modelo, se traduce en valores de AAC más bajos en comparación con los obtenidos en las tasas de éxito. Aun así, las diferencias encontradas no son muy significativas. De hecho, sólo en el caso de los desprendimientos de la RSA hubo una diferencia entre el éxito y la predicción AAC superior al 0,1.

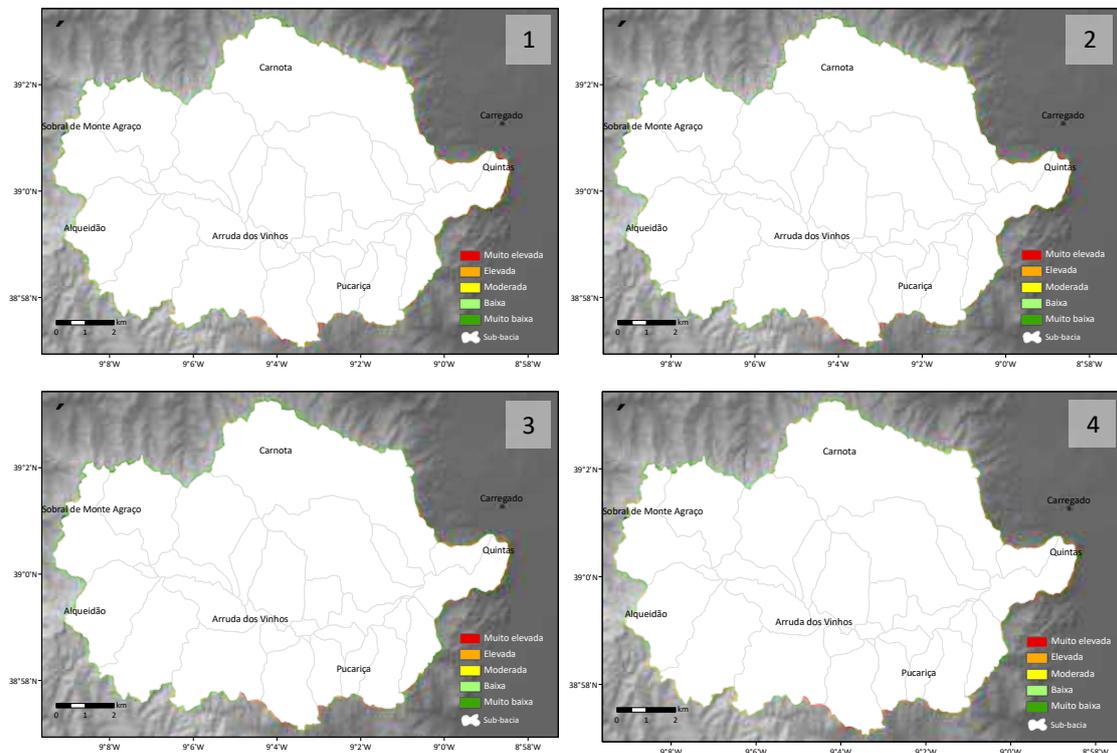
Los modelos de susceptibilidad presentan un ajuste y una capacidad predictiva considerada de aceptable a muy buena, lo que se evidencia en que casi todos los modelos tienen valores de AAC superiores a 0,73, siendo los modelos de susceptibilidad construidos para deslizamientos traslacionales (TS) y para deslizamientos traslacionales en ladera (TSA) los que presentan el mejor ajuste y la mejor capacidad predictiva. La excepción a estos buenos resultados fue la validación independiente (con la partición B) del modelo A de RSA, en la que se obtuvo un valor de AAC de 0,67.

*Tabla 6 – Valores AAC de las curvas de éxito y predicción de los modelos de susceptibilidad basados en la partición aleatoria del inventario total, por tipo de movimiento de ladera.*

	Área Abaixo da Curva (AAC)		
	Taxas de sucesso	Taxas de predição	Diferença
Itotal_Model A Valid B	0,78	0,75	-0.03
Itotal Model B Valid A	0,76	0,75	-0.01
R Model A Valid B	0,77	0,77	0.00
R Model B Valid A	0,80	0,74	-0.06
RS Model A Valid B	0,79	0,77	-0.02
RS Model B Valid A	0,80	0,73	-0.07
RSA Model A Valid B	0,82	0,67	-0.15
RSA Model B Valid A	0,79	0,73	-0.06
TS Model A Valid B	0,90	0,88	-0.02
TS Model B Valid A	0,91	0,85	-0.06
TSA Model A Valid B	0,83	0,88	0.05
TSA Model B Valid A	0,88	0,80	-0.08

Los mapas de susceptibilidad a cualquier tipo de movimiento de ladera basados en la partición aleatoria de los inventarios tienden a ser muy similares con respecto al padrón de susceptibilidad. Esto, siempre que la partición divida las series en dos grupos relativamente homogéneos, como se observa en las Figs. 7 y 11. Los cuatro mapas de susceptibilidad a los deslizamientos (R) profundos presentados en la Fig. 11 fueron generados por los grupos A (Mapas 1 y 2) y B (Mapas 3 y 4) y clasificados según sus respectivas curvas de éxito (Mapas 1 y 3) y de predicción (Mapas 2 y 4). Visualmente los mapas

no difieren significativamente, sobre todo en lo que respecta a la clase de mayor susceptibilidad (en rojo).



**Figura 11 – Mapas de susceptibilidad a los deslizamientos rotacionales clasificados según los valores definidos por las curvas de éxito (1 y 3) y las curvas de predicción (2 y 4). 1) Modelización - grupo A, Validación - grupo A; 2) Modelización - grupo A, Validación - grupo B; 3) Modelización - grupo B, Validación - grupo B; 4) Modelización - grupo B, Validación - grupo A.**

En el caso de modelos con un rendimiento predictivo similar, como en este caso, la aplicación de la herramienta *rank difference tool* permite evaluar la variación espacial del padrón de susceptibilidad. La verificación de la concordancia espacial de los diferentes mapas de susceptibilidad producidos para los deslizamientos rotacionales profundos (R), clasificados según sus curvas de éxito y predicción, se presenta en la Fig. 12. La verificación por pares entre los mapas de susceptibilidad de deslizamientos rotacionales profundos de 4 R (Fig. 11), permite evaluar las diferencias espaciales, para cada píxel, de la concordancia en cuanto a la clasificación de la susceptibilidad en cada uno de los mapas elaborados a partir de las particiones A y B del inventario de deslizamientos profundos (R) y a partir de la

clasificación mediante las respectivas curvas de éxito (Cs) y de predicción (Cp).

Para ello se crean 6 modelos de comparación *pairwise*: modelo R\_rank\_dif\_1 (R\_modelo-A\_Cs - R\_modelo-A\_Cp); modelo R\_rank\_dif\_2 (R\_modelo-A\_Cs - R\_modelo-B\_Cs); modelo R\_rank\_dif\_3 (R\_modelo-A\_Cs - R\_modelo-B\_Cp); modelo R\_rank\_dif\_4 (R\_modelo-A\_Cp - R\_modelo-B\_Cs); modelo R\_rank\_dif\_5 (R\_modelo-A\_Cp - R\_modelo-B\_Cp); e modelo R\_rank\_dif\_6 (R\_modelo-B\_Cs - R\_modelo-B\_Cp).

El cuadro 7 cuantifica los porcentajes de superficie afectados por el cambio de susceptibilidad en la comparación *pairwise*. Para ello, los mapas de susceptibilidad se clasificaron de 1 a 5, donde 1 corresponde al valor de susceptibilidad más alto y 5 al valor de susceptibilidad más bajo. En los mapas de la Fig. 12, el valor 0 indica zonas clasificadas por igual en ambos mapas. Los tonos cálidos representan zonas en las que el valor de susceptibilidad del mapa de comparación presentaba un valor de susceptibilidad menor en comparación con el mapa base, y los tonos verdes representan zonas en las que ocurre lo contrario (aumento de la susceptibilidad).

A partir de la comparación *pairwise*, es posible definir que el grado de concordancia espacial entre los 4 mapas de susceptibilidad (valor 0 en la Fig. 12 y la Tabla 7) es siempre superior al 50%. Si a éstas se añaden las zonas en las que la desviación del valor inicial de la susceptibilidad era de un solo orden de magnitud (+1 o -1), la zona implicada es siempre superior al 96%. Según Poli y Sterlachini (2007), este es un buen indicador de la concordancia espacial entre los diferentes modelos de susceptibilidad.

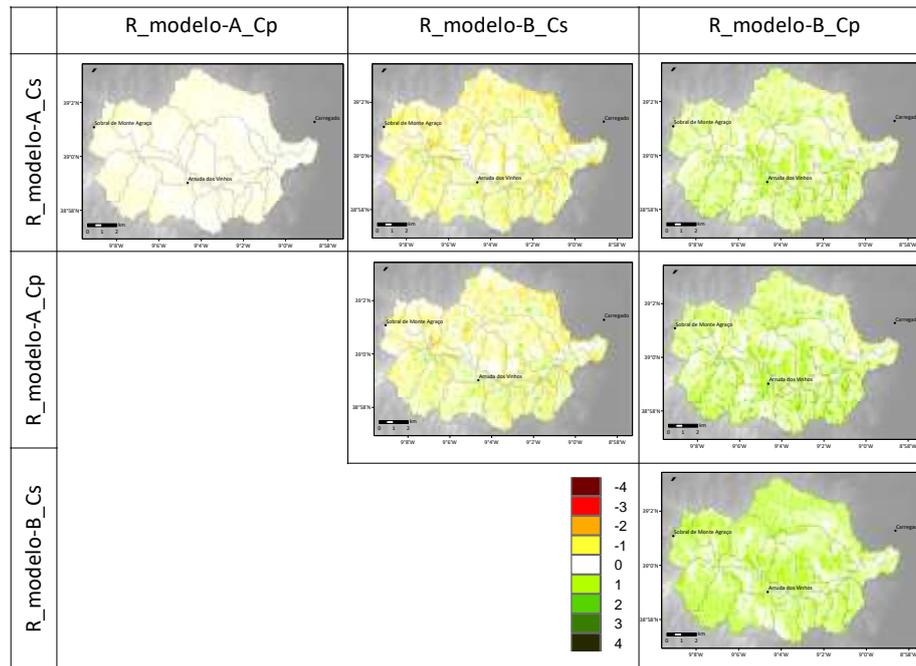


Figura 12 – Diferencia espacial entre pares de mapas de susceptibilidad a los deslizamientos profundos (R) producidos con la partición aleatoria del inventario. La matriz refleja las posibilidades de comparación de los mapas de susceptibilidad definidos en la Fig. 11Cs clasificación del mapa de susceptibilidad basada en la curva de éxito; Cp clasificación del mapa de susceptibilidad basada en la curva de predicción.

Tabla 7 – Cuantificación de la diferencia espacial (área afectada en cada grado de diferencia entre los mapas de base y de comparación) entre pares de mapas de susceptibilidad a los deslizamientos rotacionales (R).

Comparação pairwise	R_rank _dif_1	R_rank _dif_2	R_rank _dif_3	R_rank _dif_4	R_rank _dif_5	R_rank _dif_6
-4	--	0,0	--	0	--	--
-3	--	0,1	0,0	0,1	0	--
-2	--	3,5	0,3	3,2	0,3	--
-1	10,1	25,2	8,5	19,4	6,8	--
0	<b>89,2</b>	<b>63,6</b>	<b>61,5</b>	<b>66,9</b>	<b>57,3</b>	<b>53,5</b>
1	0,7	7,4	28,2	9,8	32,6	46,5
2	--	0,2	1,4	0,6	3,0	--
3	--	0,0	0	0	0	--
4	--	0,0	0	0	0	--
Soma +1-1	10,8	32,6	36,7	29,2	39,3	46,5
Soma 0+1-1	100,0	96,2	98,2	96,1	96,7	100
Dif acima - 1+1	0	3,8	1,8	3,9	3,3	0

## 4. CONCLUSIONES

La cuenca del Rio Grande da Pipa corresponde, en el contexto de la región del norte de Lisboa e incluso a nivel nacional, a una de las zonas con mayor predisposición a la ocurrencia de movimientos de ladera. En la zona de estudio se inventariaron más de 1400 movimientos de ladera que suman casi el 6% de la zona de estudio. La gran mayoría de estos movimientos se produjeron antes de 2006. El inventario global incluye dos eventos de inestabilidad desencadenados, en 1983 por precipitaciones intensas y de corta duración, y en 2010 por lluvias persistentes y prolongadas. Para ambos eventos fue posible obtener inventarios completos de eventos en el área de estudio. La evaluación de la susceptibilidad al movimiento de ladera, separada por tipo de movimiento, se calculó considerando el método estadístico bivariado del Valor Informativo. A partir del análisis de los mapas de susceptibilidad se pudo comprobar que los diferentes tipos de manifestaciones de inestabilidad tienen diferentes patrones de distribución espacial, que se reflejan en diferentes zonificaciones de susceptibilidad, es decir, diferentes factores de predisposición. Todos los modelos presentan un rendimiento entre aceptable y muy bueno, tal como expresa el rango de valores AAC de las curvas de éxito y predicción, excepto un modelo, entre 0,73 y 0,91.

## 5. REFERENCIAS

Baeza, C.; Corominas, J. (2004) – Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques. *Earth Surface Processes and Landform*. 26: 1251 – 1263.

Beguería, S. (2006) – Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management. *Natural Hazards*. 37: 315 – 329.

Bi, J.; Bennett, K. P (2003) – Regression Error Characteristic Curves. *Proceedings of the Twentieth International Conference on Machine Learning (ICML-2003)*. Washington DC.

Blahut, J.; van Westen, C. J.; Sterlacchini, S. (2010) – Analysis of landslide inventories for accurate prediction of debris-flow source areas. *Geomorphology*. 119: 36 – 51.

Chung, C-J. F.; Fabbri, A. G. (1999) - Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 65(12): 1389 – 1399.

Chung, C-J. F.; Fabbri, A. G. (2003) – Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazards*. 30: 451 – 472.

Chung, C-J. F.; Fabbri, A. G. (2005) – Systematic procedures of landslide hazard mapping for risk assessment using spatial prediction models in Glade, T.; Anderson, M.; Crozier, M. J. (Eds.) *Landslide Hazard and Risk*. John Wiley & Sons, Ltd. Chichester: 139 – 174.

Garcia, R. A. C. (2012) – Metodologias de Avaliação da Perigosidade e Risco associado a movimentos de vertente. Aplicação na bacia do rio Alenquer. Dissertação de doutoramento em Geografia na Especialidade em Geografia Física. Instituto de Geografia e Ordenamento do Território. Universidade de Lisboa.

Garcia, R.A.C.; Oliveira, S.C. (2020) Portugal landslide hazardscapes. G. Vieira; J.L. Zêzere; C. Mora (eds.), *Landscapes and Landforms of Portugal, World Geomorphological Landscapes*, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-03641-0\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-03641-0_4). Springer Nature Switzerland AG 2020 pp. 63-71.

Garcia, R. A. C.; Zêzere, J. L.; Oliveira, S. C. (2007) – A importância do processo de classificação de dados na cartografia: um exemplo na cartografia de susceptibilidade a movimentos de vertente. *Dinâmicas geomorfológicas. Metodologias. Aplicação. Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos*. Vol. V. Lisboa: 265 – 279.

Oliveira, S. C. (2012) Incidência espacial e temporal da instabilidade geomorfológica na bacia do rio Grande da Pipa (Arruda dos Vinhos). Dissertação de doutoramento em Geografia na Especialidade em Geografia Física. Instituto de Geografia e Ordenamento do Território. Universidade de Lisboa.

Oliveira, S. C., Zêzere, J. L., Catalão, J. and Nico, G. (2015) The contribution of PSInSAR interferometry to landslide hazard in weak rock-dominated areas, *Landslides*, 12(4), 703–719, doi:10.1007/s10346-014-0522-9.

Oliveira, S. C., Zêzere, J. L., Lajas, S. and Melo, R. (2017) Combination of statistical and physically based methods to assess shallow slide susceptibility at the basin scale, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 17, doi:10.5194/nhess-17-1091-2017.

Reis, E. J. M. (2006) – As bacias hidrográficas das ribeiras da serra de Grândola: dinâmica hidrológica e factores condicionantes. Dissertação de Doutoramento em Geografia Física apresentada à Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa. Lisboa.

Yan, T. Z. (1988) - Recent advances of quantitative prognoses of landslides in China in Bonnard, C. (Ed.) Landslides. Proceedings of the 5th ISL, Lausanne. Vol. 2. Balkema, Rotterdam: 1263 – 1268.

Yin, K. L.; Yan, T. Z. (1988) - Statistical prediction models for slope instability of metamorphosed rocks in Bonnard, C. (Ed.) Landslides. Proceedings of the 5th ISL, Lausanne. Vol. 2. Balkema, Rotterdam: 1269 – 1272.

Zbyszewski, G.; Assunção, C. Torre de (1965) – Notícia explicativa da folha 30-D (Alenquer). Carta Geológica de Portugal (1:50 000). Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa.

Zêzere, J. L. (2002) – Landslide susceptibility assessment considering landslide typology. A case study in the area north of Lisbon (Portugal). Natural Hazards and Earth System Sciences. 2: 73 – 82.

Zêzere, J. L. (2005) – Dinâmica de vertentes e risco geomorfológicos (Programa). Centro de Estudos Geográficos. Área de Geografia Física e Ambiente. 41. Lisboa.

Zêzere, J. L. (2010) – Relatório do programa de Perigosidade, Vulnerabilidade e Riscos no Território: aplicação aos movimentos de vertente. Provas de Agregação. Universidade de Lisboa.

Zêzere, J. L., Pereira, S., Melo, R., Oliveira, S. C. and Garcia, R. A. C. (2017) Mapping landslide susceptibility using data-driven methods, Sci. Total Environ., 589, 250–267, doi:10.1016/j.scitotenv.2017.02.188.

ANEXO I - Fuentes cartográficas - Formato y estructura de los datos básicos

<b>Escala /Data</b>	<b>Designação</b>	<b>Formato/estrutura</b>	<b>Produtor (proprietário)</b>
<b>1:50 000</b>	Carta Geológica de Portugal	Analógico	Serviços Geológicos de Portugal
<b>1:25 000</b>	Carta Militar de Portugal*	Analógico	Instituto Geográfico do Exército (IGE)
<b>1:25 000</b>	Carta de Uso e Ocupação do Solo (COS90)*	Vetorial (polígonos)	Instituto Geográfico Português (IGP)
<b>1:25 000</b>	Carta de Solos (SROA/ CNROA/ IEADR/IHERA/IDRHa/ DGADR)	Analógico	Direção-Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural (DGADR)
<b>1:25 000</b>	Carta Administrativa Oficial de Portugal (CAOP)*	Vetorial (polígonos)	Direção Geral do Território (DGT)
<b>1:10 000</b>	Base Geográfica de Referenciação da Informação (BGRI) 2011	Vetorial (polígonos)	Instituto Nacional de Estatística (INE)
<b>1:10 000</b>	Altimetria	Vetorial (linhas, pontos)	Associação dos Municípios do Oeste
<b>1:10 000</b>	Ortofotomapas*	Imagem / matricial (célula 0,5x0,5 m)	Associação dos Municípios do Oeste
<b>1:10 000 Março 2018</b>	Rede viária e infraestruturas*	Vetorial (linhas, pontos, polígonos)	Associação dos Municípios do Oeste
	Edificado*	Estatística	Instituto Nacional de Estatística