

ZONIFICACIÓN DE LA PELIGROSIDAD EN BASE A LA COMBINACIÓN DE TÉCNICAS DE CARTOGRAFIA Y CÁLCULO NUMÉRICO EN ZONAS DE ALTA SUSCEPTIBILIDAD EN SORT (PIRINEO CENTRAL)

**Pere BUXÓ^{1*}, Marcel BARBERÀ¹, Ferran LÓPEZ¹, Joan MARTINEZ-BOFILL²
Jordi MARTURIÀ³**

¹ Geocat Gestió de Projectes S.A.

² GEOMAR Enginyeria del Terreny, S.L.P.

³Institut Geològic de Catalunya

RESUMEN

Se expone en el artículo la metodología seguida para la zonificación de la peligrosidad geológica en una ladera del municipio de Sort (Pirineo central). El sector estudiado, corresponde a nuevo crecimiento municipal, y es limítrofe con un área afectada por grandes deslizamientos, reactivados en la década de 1990 por la excavación de los taludes de la carretera N-260 a su paso por Sort (deslizamiento de Bressui). Geológicamente y topográficamente, ambas áreas presentan grandes similitudes.

Para ello, se han utilizado técnicas de cartografía geomorfológica, caracterización geotécnica y de modelización mediante elementos finitos y de equilibrio límite. Se han comparado las distintas técnicas de modelización, obteniendo una buena convergencia de resultados entre los métodos de equilibrio límite y los métodos de elementos finitos en 2D. La combinación de las técnicas utilizadas, ha permitido zonificar la susceptibilidad del terreno frente a deslizamientos y finalmente presentar la zonificación de peligrosidad.

Palabras clave: riesgo geológico, peligrosidad, modelización geotécnica, deslizamiento, cartografía

1. INTRODUCCIÓN

Por encargo de la Direcció General d'Urbanisme de la Generalitat de Catalunya (DGU) el Institut Geològic de Catalunya conjuntamente con las empresas GEOCAT Gestió de Projectes S.A. y GEOMAR Enginyeria del Terreny, S.L.P. han llevado a cabo la zonificación del riesgo

geológico del sector del Torrentill, área de una extensión de 6,26 ha, situada en el término municipal de Sort (Pirineo de Lerida) para su posible urbanización.

Este sector se sitúa en el límite norte de una zona que entre los años 1993 y 1996 se vio afectada por importantes movimientos de masa (30.000m^2 de superficie afectada) que ocasionaron daños en un tramo de la ladera situada entre la carretera N-260 (PK 25+700 y 25+900) y la población de Bressui. El movimiento de ladera se desarrolló por la activación de un deslizamiento antiguo y se inició con la modificación de un talud en las obras de ampliación de la carretera N-260. La corrección del movimiento requirió una fuerte intervención que incluyó la ejecución obras de contención, drenaje profundo e inyecciones (L.M., Sopeñas et al., 2000).



Figura 1: Vista general de la ladera objeto de estudio. En el centro de la imagen se observa el núcleo de Bressui afectado por grandes deslizamientos. Dentro del círculo rojo se encuentra la zona estudiada.

Debido a la fuerte susceptibilidad atribuida al sector de estudio se planteó la necesidad de efectuar una zonificación cuantitativa de la peligrosidad empleando la integración de técnicas de cartografía geomorfológica, caracterización geotécnica, instrumentación y modelización numérica. La secuencia de trabajos incluyó la realización de una campaña de muestreo e instrumentación, caracterización geotécnica mediante presiómetros, piezómetros y ensayos triaxiales.

2. MARCO GEOLÒGICO

La zona de estudio se halla en el Pirineo de Lleida y geológicamente forma parte de los mantos inferiores de zócalo de los Pirineos centrales. Las principales estructuras geológicas son los mantos del Orri y de Rialp, que corresponden a estructuras cabalgantes de edad alpina (X. Berástegui et. al, 1993). El manto del Orri cabalga el manto de Rialp, que debido a la erosión del río Noguera Pallaresa ha quedado descubierto, dando lugar a una ventana tectónica. El manto del Orri está constituido por materiales metasedimentarios paleozoicos con un rango de edades que van del Cámbrico-Ordovícico hasta al Carbonífero mientras que el manto de Rialp, en la zona de estudio, está constituido por una serie estratigráfica triásica formada por calizas tableadas alternantes con margas y lutitas ocreas, seguidas de lutitas rojas con intercalaciones de yeso y un potente nivel de yesos superior, estos materiales se atribuyen a la facies triásicas del Muschelkalk y del Keuper.

El substrato está localmente y discontinuamente recubierto por formaciones superficiales cuaternarias. La mayor parte de la área de estudio y alrededores los materiales aflorantes corresponden a depósitos cuaternarios aluviales y coluviales (G. Furdada y J.M. Vilaplana, 1988).

3. CARTOGRAFÍA Y CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA

En el reconocimiento geomorfológico realizado se ha distinguido tres niveles de depósitos aluviales en función de su posición espacial respecto al nivel del río Noguera Pallaresa: los depósitos del cauce actual del río, las terrazas bajas situadas entre 1m y 3m sobre el cauce y las terrazas antiguas, situadas a 30m y a 70m sobre el nivel actual. La terraza superior se deduce de la información de uno de los sondeos del CEDEX para los trabajos de estabilización de Bressui (CEDEX, 1997).

Los materiales coluviales proceden en gran parte de materiales asociados a antiguos deslizamientos. Se ha distinguido también 3 niveles de depósitos asociados al encajamiento del río: **1)** los depósitos más antiguos, se encuentran muy por encima de la población de Bressuí, están formados por cantos de calizas de edad devónica y proceden del desmantelamiento de macizos paleozoicos y en menor proporción pizarras que dieron lugar a depósitos coluviales bien desarrollados; **2)** estos mismos niveles, en una nueva fase de encaje del río, fueron objeto de nuevos deslizamientos, dando lugar a depósitos litológicamente similares pero con una estructura menos organizada; **3)** posteriormente, cuando el río alcanzó el nivel del substrato se formaron escarpes en los materiales triásicos, llegándose a desarrollar desprendimientos y deslizamientos que involucraron los depósitos deslizados anteriormente y el propio substrato triásico.

Los deslizamientos provenientes de coluviales antiguos que se encuentran por encima del núcleo de Bressui constituyen depósitos formados por cantos y bloques, mayoritariamente de calizas devónicas y en menor proporción pizarras y areniscas carboníferas y pizarras silurianas englobados en una matriz arcillosa de proporciones variables. Según la descripción

de los sondeos la matriz está formada por limos arenosos con tramos arcillosos de coloraciones marrón con gravilla de caliza.

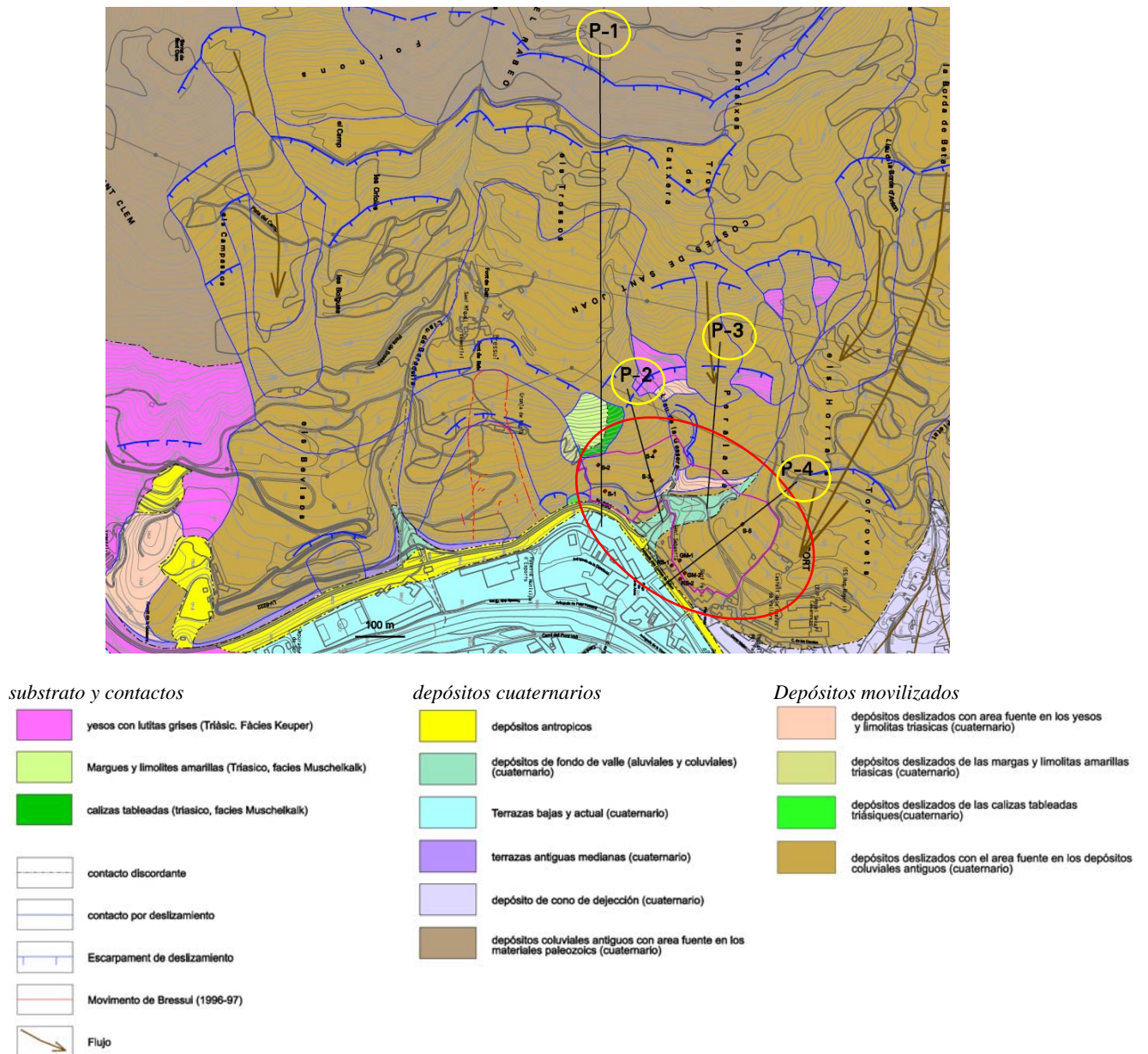


Figura 1. Cartografía geomorfológica del la ladera de estudio. En el círculo rojo se destaca la zona de estudio y con círculos amarillos los perfiles utilizados para la modelización.

Los depósitos procedentes del desmantelamiento del substrato triásico son más heterogéneos pero en general se caracterizan por la presencia de yeso y cantos de calizas. Esencialmente

hay tres tipos de materiales: *i*) limos arenosos de coloraciones de marrón claro a ocre con intercalaciones lutíticas gris verdosas y laminaciones o nódulos de yeso, *ii*) lutitas y limos arenosos compactos con coloraciones marronosas, verdosas y azuladas con yeso en la matriz, contienen cantos de calizas triásicas, su procedencia se atribuye a los tramos de margas y yesos triásicos y *iii*) yesos con lutitas azules y grises de aspecto margoso de compacidad elevada procedentes de los tramos de yesíferos del triásico.

4. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

Se ha llevado a cabo una caracterización geotécnica exhaustiva de los depósitos cuaternarios y del substrato (tabla 1) (tabla 2). Las distintas unidades geológicas han sido asignadas a las unidades geotécnicas que se listan: **1**) unidad coluvial superior (*QCsup*), **2**) unidad coluvial inferior (*QCinf*), **3**) unidad coluvial con pizarra siluriana (*QCsil*), **4**) unidad aluvial (*Qa*) y **5**) unidad Keuper (*K*)

Sondeo	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5
Longitud (m)	21.5	20.0	21.0	20.0	20.0
SPT (unidades)	5	4	3	4	6
Muestra inalterada/parafinada	5	7	6	7	6
Presiometro	2	2	2	2	0
Piezómetro de Casagrande	si	no	No	no	si
Instrumentación Inclinométrica	no	si	Si	si	no

Tabla 1. Relación de trabajos de prospección.

Humedad en estufa (UNE 103 300:1993)	8
Densidad de un suelo (UNE 103 301:1993)	26
Densidad de las partículas (UNE 103 302:1994)	2
Granulometría por tamizado (UNE 103 101:1995)	20
Límites de Atterberg (UNE 103 103 y 104:1994)	20
Compresión simple (UNE 103 400 : 1993)	3
Corte directo CD (UNE 103 401 : 1998)	1
Compresión triaxial CU (UNE 103 402 : 1998)	4
Ensayo Lambe (UNE 103 600 : 1996)	5
Sulfatos solubles cualitativos (UNE 103 202 : 1995)	4
Sulfatos solubles cuantitativos UNE 103 201 : 1996	6
Contenido en yeso (NLT 115/99)	5
Contenido en materia orgánica (UNE 103 204 : 1993)	2

Tabla 2. Relación de trabajos de ensayos de laboratorio.

Unidad	<i>QCsup</i>	<i>QCinf</i>	<i>QCsil</i>	<i>Qa</i>	<i>K</i>
--------	--------------	--------------	--------------	-----------	----------

Densidad seca (kN/m ³)	19.9	18	19.6	--	18.3
Humedad Natural (%)	11.4	14.5	12	--	15
% <5mm	53	79	44	85	ROCA
% <2mm	44	69	30	50	
% <0.4mm	35	59	28	15	
% <0.08mm	28	50	26	11	
Límite líquido (%)	29	33	24.4	--	
Índice de plasticidad (%)	18	11	9.2	--	

Tabla 3. Resultado ensayos de identificación

Unidad	<i>QC_{sup}</i>	<i>QC_{inf}</i>	<i>QC_{sil}</i>	<i>Q_a</i>	<i>K</i>
SPT	30	34	18	rechazo	rechazo
Ep (MPa)	11.3	5.4	--	--	--
Pl /Cu (kPa)	252	197	--	--	--

Tabla 4. Resultados ensayos in situ (SPT y presiometros)

Unidad	<i>QC_{sup}</i>	<i>QC_{inf}</i>	<i>QC_{sil}</i>	<i>Q_a</i>	<i>K</i>
Peso específico seco (kN/m ³) γ_d	19.5	17	20	18	23
Peso específico saturado (kN/m ³) γ_{sat}	22	19.7	22	21	23
Módulo de Young (kN/m ²) <i>E'</i>	11346	5485	500	30000	30000
Coefficiente de Poisson	0.3	0.3	0.35	0.3	0.3
Cohesión (kN/m ²) <i>c'</i>	10.3		24.5	5	0.1
Ángulo de rozamiento (°) ϕ'	33.8	30	34	45	35
Angulo de dilatancia (°) ψ	3.8	0	0.4	15	5

Tabla 5. Valores de diseño adoptados en el cálculo geotecnico

5. MODELIZACIÓN GEOTÉCNICA

Se han realizado 4 perfiles geológicos-geotécnicos de longitud suficiente para evaluar la posibilidad de afección a zonas alejadas del área de actuación mediante el análisis numérico. Se planteó de forma independiente la modelización con métodos de equilibrio límite (MEL) y métodos de elementos finitos en 2D (MEF) con el fin de comparar las soluciones obtenidas y la convergencia de los resultados. Se esperaba que los modelos aportaran: 1) las formas de las roturas más probables en función de la geometría del subsuelo y 2) los factores de seguridad de la rotura más probable.

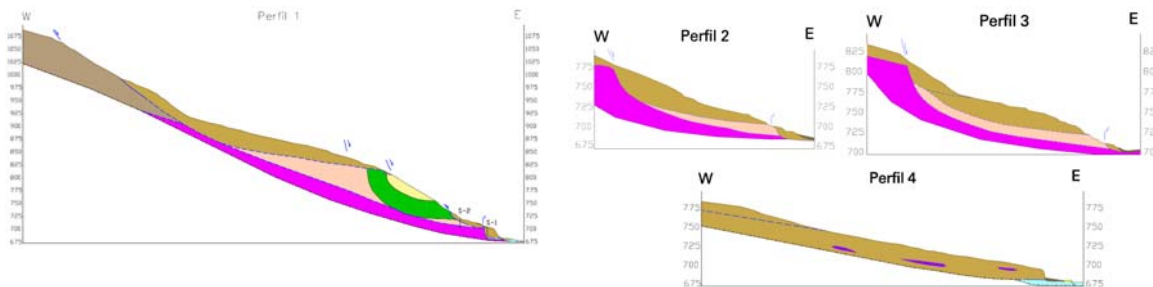


Figura 2. Perfiles geológicos-geotécnicos objeto de la modelización y cálculo de superficies de deslizamiento (leyenda figura 1).

En los métodos de equilibrio límite (MEL) el factor de seguridad se evalúa con los criterios de equilibrio global (fuerzas resistentes/fuerzas movimiento). En el cálculo se ha utilizado el método simplificado de Bishop con el cual se generan superficies de deslizamiento circular y se resuelve el problema de movimiento mediante el equilibrio de momentos y fuerzas. El código utilizado para el análisis fue SLOPE/W (GEO-SLOPE International Ltd) que permite la generación de círculos mínimos (superficie crítica) y además mapea los factores de seguridad para una gran cantidad de círculos. Los parámetros asignados al terreno son los expuestos en el apartado anterior. Se han evaluado distintos varios casos de nivel freático para simular condiciones posibles a lo largo del tiempo.

El análisis con elementos finitos (MEF) se ha realizado mediante el código MIDAS GTS v 2.2 (Geotechnical and Tunnel analysis System) trabajando en 2 dimensiones y deformación plana. El código permite el análisis de deformaciones y tensiones. El modelo constitutivo adoptado para los distintos materiales corresponde al de Mohr-Coulomb. Se trata de un modelo cohesivo-friccional elastoplástico con elasticidad lineal. En este caso la geometría más probable de rotura se obtiene con el estudio del campo de desplazamientos y las tensiones de cizalla máxima. El cálculo del factor de seguridad se ha realizado mediante la reducción de factores resistentes (ángulo de rozamiento y cohesión). En el caso del análisis MEF también se ha simulado distintos escenarios de nivel freático. Se presentan como ejemplo las figuras de las superficies más probables de roturas obtenidas para los perfiles 1 y 2 según los dos métodos de análisis (caso seco sin desmontes).

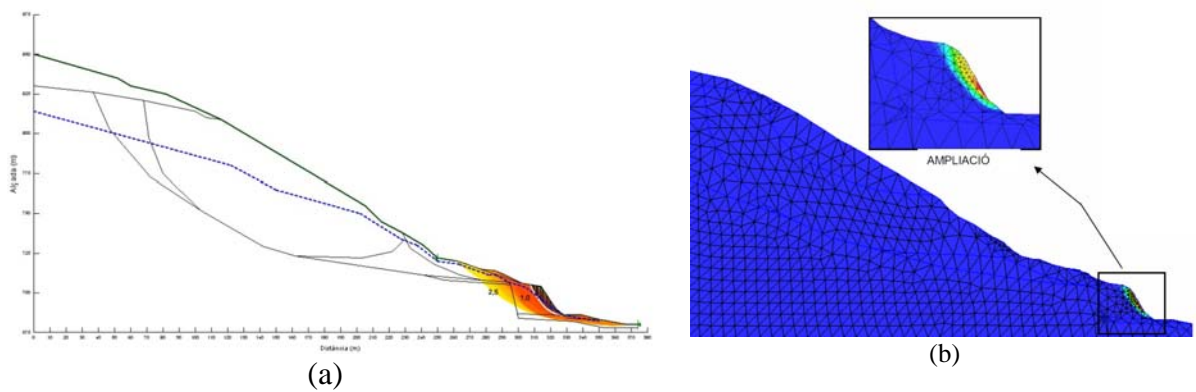


Figura 3. Superfícies de rotura més probable obtenides en el perfil 1 (a) MEL i (b) MEF.

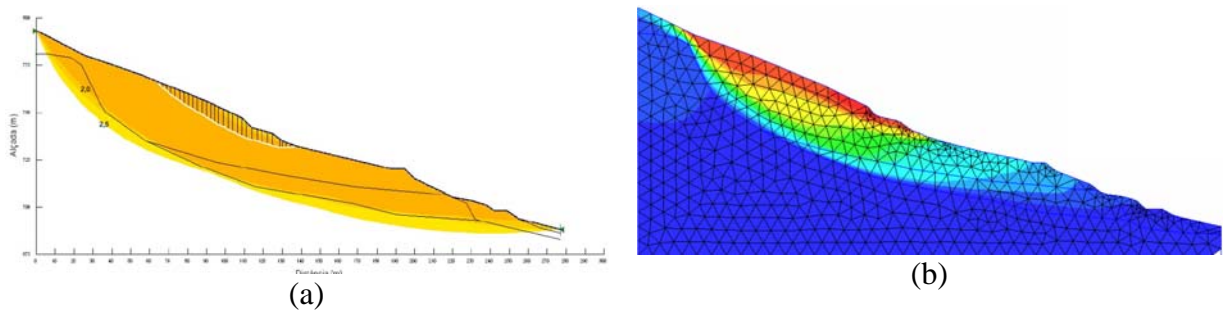


Figura 4. Superfícies de rotura més probable obtenides en el perfil 2 (a) MEL i (b) MEF.

Se exponen los resultados de la modelización en la siguiente tabla por perfiles y métodos de cálculo.

Perfil	$PI(ladera)$	$PI(local)$	$P2$	$P3$	$P4$
FS (caso seco)	1.81	0.95	1.70	1.24	2.82
FS (caso con nivel freàtic)	1.72	0.79	0.96	0.73	2.57

Tabla 6. Valores del Factor de seguridad obtenidos mediante MEL.

Perfil	$PI(ladera)$	$PI(local)$	$P2$	$P3$	$P4$
FS (caso seco)	1.53	0.96	1.73	1.31	2.6
FS (caso con nivel freàtic)	1.13	0.73	1.06	0.42	2.1

Tabla 7. Valores del Factor de seguridad obtenidos mediante MEF.

Dentro de los casos analizados se ha incluido también la modificación del perfil topográfico simulado el efecto de urbanización de la ladera para prevenir la reactivación de movimientos de masa antiguos.

6. ZONIFICACIÓ DE LA PELIGROSIDAD

En base al cálculo geotécnico se han establecido los grados de peligrosidad que se describen en la tabla 9: muy alta, alta, mediana y baja. El criterio de asignación de peligrosidad se basa fundamentalmente en los factores de seguridad obtenidos en el análisis con la valoración de la magnitud del deslizamiento en función de la geometría. Hay que hacer notar en este punto que los factores de seguridad obtenidos en los dos métodos de cálculo no son directamente comparables si bien indican cualitativamente cuán lejos está el terreno de una probable rotura. La estimación de la magnitud y la frecuencia se enlaza con la geometrías de las superficies de rotura y con las situaciones posibles del nivel freático a lo largo del tiempo en la ladera fruto de periodos de intensa precipitación.

Matriz de susceptibilidad		Caso Seco			
		FS<0.95	FS [1-1.5]	FS [1.5-2]	FS>2
Con variación del NF	FS<0.95				
	FS [0.95-1.5]				
	FS [1.5-2]				
	FS > 2				

Muy alta
 Alta
 Media
 Baja

Tabla 8. Matriz de susceptibilidad frente a deslizamientos.

Matriz de Peligrosidad natural		Susceptibilidad			
		Muy alta	Alta	Media	baja
Magnitud (m ²)	>400m ² (alta)				
	100-400m ² (media)				
	<100m ² (baja)				

Muy alta
 Alta
 Media
 Baja

Tabla 9. Matriz de peligrosidad natural.

Del conjunto de trabajos ha resultado en un mapa de peligrosidad / susceptibilidad geológica (1:1.000) en base a criterios del factor de seguridad y magnitud sobre el cual se han definido las recomendaciones necesarias para desarrollar la correcta planificación urbanística del sector (acciones y recomendaciones). Se han establecido 3 grados de peligrosidad: **1)** Zonas de peligrosidad alta: puntos en un estado crítico de estabilidad donde se pueden desarrollar movimientos de masa a corto plazo sin la intervención antrópica **2)** zonas de peligrosidad media: zonas donde los análisis numéricos han constado que son especialmente sensible a la

modificación del perfil topográfico (ejecución de nuevos taludes) o a la variación de las condiciones de agua y 3) zonas de peligrosidad baja: áreas aptas para edificar donde no se han detectado indicios de movimiento y la modelización numérica demuestra que los factores de seguridad tienen un margen suficientemente amplio para resistir modificaciones razonables de las acciones en el terreno. En la figura 5 se muestra la zonificación de las parcelas del Torrentill.

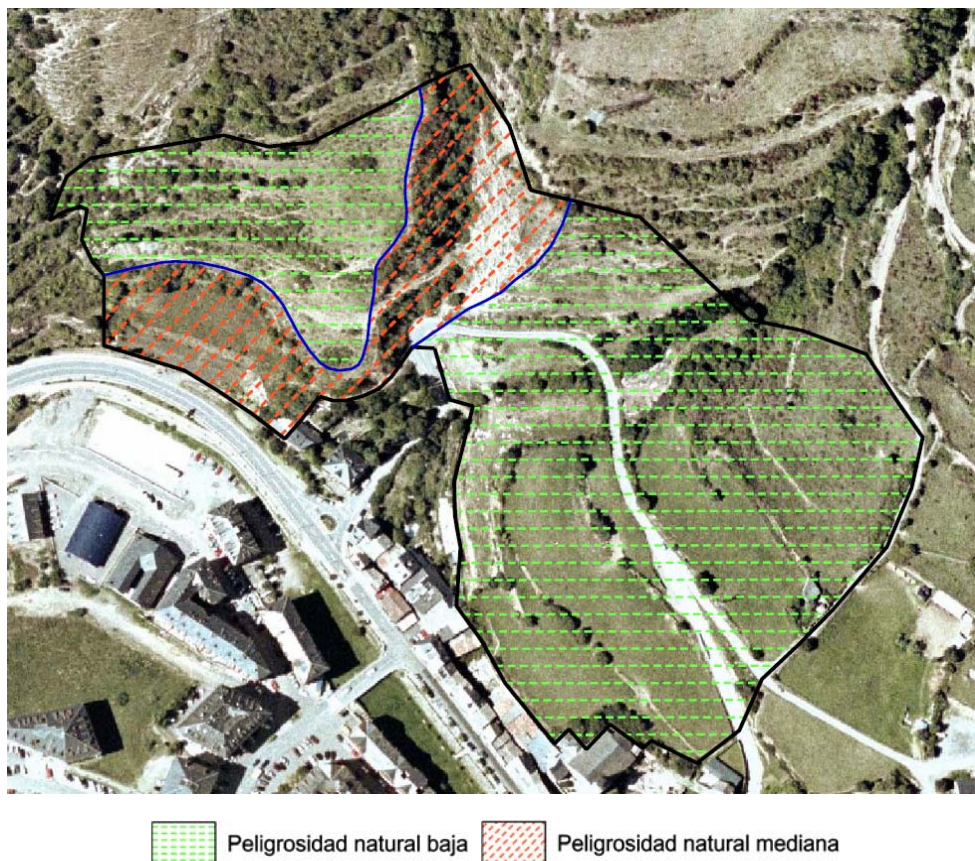


Figura 5. Zonificación de la peligrosidad geológica natural en el sector de estudio.

12. CONCLUSIONES

- El trabajo muestra que la combinación y síntesis del análisis geomorfológico con la caracterización geotécnica y el análisis numérico resulta ser un método efectivo para el estudio y zonificación de sectores con fuerte susceptibilidad de desarrollar movimientos del terreno. En estos casos se requieren criterios objetivables y reproducibles para establecer los límites de la zonificación.
- Los análisis numéricos llevados a cabo MEL y MEF han obtenido una buena correlación entre ellos, tanto des del punto de vista de generación de geometrías

de rotura como de los análisis de los factores de seguridad siendo ambos métodos validos y complementarios para este tipo de trabajos.

- Se ha observado que los factores de seguridad obtenidos con métodos de equilibrio límite son (MEL) más conservadores que los análisis MEF para la situación analizada y teniendo en cuenta la presencia de una lámina de agua relativamente próxima a la superficie.
- Un trabajo adicional consistiría en establecer la correlación de los factores de seguridad calculados en función de la relación de fuerzas resistentes con fuerzas motoras (MEL) y los calculados en base a la reducción de coeficientes resistentes (MEF).

REFERENCIAS

- Berástegui, X., Losantos, M., Muñoz, J. A., Puigdefabregas, C. (1993): Tall geològic del Pirineu central 1:200 000. Servei Geològic de Catalunya & Institut Cartogràfic de Catalunya, Generalitat de Catalunya Departament de Política Territorial y Obres Públiques, Barcelona.
- Furdada, G y Vilaplana, J.M. (1988). “Grandes deslizamientos en las laderas de la Vall d’Àssua y margen derecho de la ribera de Sort (Alta Cuenca de la Noguera Pallaresa)”. II Simposio sobre taludes y laderas inestables. Andorra la Vella. 9 a 11 de març de 1988.
- Geo-Slope International LTD. (2004) –GEO-SLOPE INTERNATIONAL LTD. 1991. Slope/W. Version 7 for slope stability analysis. Reference manual. Canada
- Laboratorio de Geotècnia del CEDEX (1997). “Asistencia técnica en materias geotécnicas a las subdirecciones generales de construcción y conservación, informe parcial nº 98, Trabajos de estabilización de la ladera de Bressui (Sort –Lleida CN-260) Resumen y conclusiones”. Informe Interno.
- Midas Information Technology Co LTD. (2005). Midas GTS Analysis System Software V2.2.
- Sopeña, L.M.; de las Heras, C.; y Salinas, J.L. (2000): Estabilización de una ladera natural singular mediante drenaje profundo y técnicas de mejora de suelos”. II Congreso Andaluz de Carreteras, Cádiz.