

APLICACIÓN DEL MÉTODO DE NEWMARK PARA EL ESTUDIO DE LOS MOVIMIENTOS DE LADERA ACTIVADOS POR TERREMOTOS EN ANDORRA

FIGUERAS VILA, Sara. Institut Cartogràfic de Catalunya.Barcelona.
MACAU ROIG, Albert. Institut Cartogràfic de Catalunya.Barcelona.
GOULA SURINACH, Xavier. Institut Cartogràfic de Catalunya.Barcelona.
GONZALEZ DÍAZ, Marta. CRECIT, Institut d'Estudis Andorrans, Andorra.

RESUMEN:

Los deslizamientos inducidos por terremotos están documentados desde el siglo IV a.c. Durante el siglo pasado causaron decenas de miles de muertos y billones de dólares en pérdidas económicas en todo el mundo. A pesar de su geomorfología y importancia económica, los deslizamientos inducidos por sismos aún no son bien comprendidos. El riesgo en los deslizamientos inducidos por sismos depende de su abundancia, su movimiento característico y de la distribución de la población y de las construcciones. Son pocos los trabajos de zonificación de la peligrosidad de deslizamientos en los que se incluya la causa sísmica, siendo éste el propósito del presente trabajo, en el que se realiza una estimación de la probabilidad de deslizamiento en función del desplazamiento calculado con el método de Newmark. La topografía de alta montaña que presenta el Principado de Andorra, su rigurosa climatología y la posibilidad de producirse un sismo predisponen al desencadenamiento de deslizamientos. El gran desarrollo urbanístico que presenta el Principado desde mediados del siglo XX, hace que sea un referente en cuanto a la necesidad de gestión del riesgo que suponen los deslizamientos.

1. INTRODUCCIÓN.

En la actualidad existen muchas publicaciones que muestran diferentes metodologías de evaluación de la peligrosidad de deslizamientos según los diferentes grupos de trabajo. Algunas técnicas se basan en la determinación directa de la peligrosidad usando mapas geomorfológicos, mientras que otras se basan en la determinación indirecta de la peligrosidad

mediante modelos estadísticos y determinísticos, que interrelacionan los factores de relieve y la distribución de los deslizamientos. Existen trabajos que combinan las dos técnicas, directas e indirectas. La variedad de trabajos muestran que, en la mayor parte de los países no existen normativas específicas sobre la obtención de estos mapas de zonificación. Ante todo la función de estos mapas es informar a los organismos de protección civil, cuyo objeto prioritario es la protección de la vida humana, aunque también deberían ser considerados en la planificación del uso del terreno.

Andorra es un país de alta montaña caracterizado por una geología de valles glaciares cuaternarios con una geotecnia y topografía muy particulares que está expuesto a numerosos riesgos naturales como aludes de nieve, deslizamientos de terreno, inundaciones y terremotos que intervienen tanto en la vida de las personas como en las infraestructuras de las poblaciones. En el año 2001 se establece un convenio de colaboración entre el ICC (Institut Cartogràfic de Catalunya) y el CRECIT (Centre de Recerca en Ciències de la Terra) para la caracterización del riesgo sísmico en Andorra, el trabajo que se presenta es una contribución a estos estudios de riesgo sísmico y consiste en la evaluación de la peligrosidad de deslizamientos en Andorra inducidos por terremotos.

En los alrededores de la zona urbanizada de Andorra la Vella (Principado de Andorra) los deslizamientos presentan una gran importancia y tienen un gran impacto social. Los deslizamientos se observan en el Solà d'Andorra y el Solà de Nadal. En esta zona los principales factores detonantes de deslizamientos son dos, uno es el agua de la lluvia y el otro pueden ser los terremotos ya que la zona de estudio, aunque presenta una sismicidad moderada, históricamente ha sufrido el efecto de terremotos importantes con epicentro en regiones vecinas. La acción introducida por un terremoto se produce instantáneamente y es más severa que en el caso de movimientos inducidos por lluvias que son más graduales y con aceleraciones y velocidades menores. Los estudios de peligrosidad sísmica asignan a Andorra una intensidad de grado VII, de aquí la importancia de estudiar la relación entre los terremotos y los deslizamientos en esta zona.

2. DESLIZAMIENTOS ACTIVADOS POR SISMOS.

Keefer (1984), estudió deslizamientos atribuidos a 40 terremotos históricos, seleccionados como muestra para deslizamientos con variada climatología, geología y sismicidad en regiones de la Tierra con mayor actividad sísmica, para intentar responder a las siguientes preguntas: qué número y distribución de deslizamientos dependen de la magnitud de un sismo, intensidad del movimiento y otros parámetros sísmicos?, qué tipos de deslizamientos son causados por terremotos?, cuántos de estos tipos son más peligrosos para las vidas humanas y bienes inmuebles?, qué materiales geológicos son más susceptibles para deslizarse en caso de terremoto?, los terremotos han reactivado deslizamientos que originalmente han sido activados por causa no sísmicas ?.

Los resultados del estudio de Keefer dan lugar a las siguientes conclusiones: a) el número de deslizamientos causados por sismos generalmente se incrementa con el incremento de la magnitud aunque las condiciones geológicas locales y los parámetros sísmicos también han

determinado el número de deslizamientos activados; b) las reactivaciones son más probables durante movimientos sísmicos que son más fuertes que los que causaron los deslizamientos pre-existentes o durante un terremoto que ocurrió donde pre-existían debido a otras causas y que son marginalmente estables; c) los deslizamientos más abundantes activados por sismos han sido la caída de bloques, ruptura de deslizamientos en suelos y deslizamientos en roca. Las avalanchas de rocas y flujos rápidos de suelo son las dos principales causantes de muertes. Las áreas afectadas por los deslizamientos presentan una fuerte correlación con la magnitud del terremoto.

En la tabla 1 se presenta un resumen de los efectos de los grandes deslizamientos activados por sismo:

AÑO	SISMO	MAGNITUD	CARACTERÍSTICA
1906	San Francisco	7.7	Miles de desliz. 32.000 km ² , docenas de muertes
1933	Long Beach	6.2	Daños en terraplenes, pav., caída de rocas
1952	Kern County	7.5	Cientos de desliz. De todo tipo. 7.000 km ²
1971	San Francisco	6.6	Centenares de desliz. De todo tipo. 3.000 km ²
1978	Santa Bárbara	5.6	Caídas de grandes rocas. 200 km ²
1994	Northdrige	6.7	Activó más de 11 mil desliz. 10.000 km ²

Tabla 1: Ejemplo de grandes deslizamientos activados por sismos.

3. MÉTODO DE NEWMARK PARA EL CÁLCULO DE LA PELIGROSIDAD DE DESLIZAMIENTOS ACTIVADOS POR SISMO

La metodología seleccionada para este estudio se basa en los métodos de Newmark (1965), Jibson(1993) y Jibson et al. (1998).

El análisis de Newmark, se ha venido usando en diseños de terraplenes antrópicos desde hace 15 años, recientemente se ha calibrado y comparando en los casos de fallas en taludes naturales inducidas por sismos demostrando su validez en la predicción de desplazamientos de un deslizamiento durante un movimiento sísmico.

3.1 Mecanismo de la estabilidad de taludes

La estabilidad de las laderas está condicionada por la acción simultánea de una serie de factores. Desde el punto de vista físico los deslizamientos se producen como consecuencia de los desequilibrios existentes entre las fuerzas que actúan sobre un volumen de terreno.

Iniciamos el análisis con una evaluación estática de la estabilidad del talud en condiciones asísmicas. En la figura 1 se describe un hipotético deslizamiento de un típico bloque deslizante. Dos fuerzas actúan en el centro de la masa de este potencial deslizamiento, una fuerza gravitacional L , a la que se opone una fuerza R , que es la resistencia del talud. La máxima resistencia R_{\max} , está en función de la resistencia del suelo del talud y puede expresarse como la integral del esfuerzo cortante por el área de la superficie deslizante.

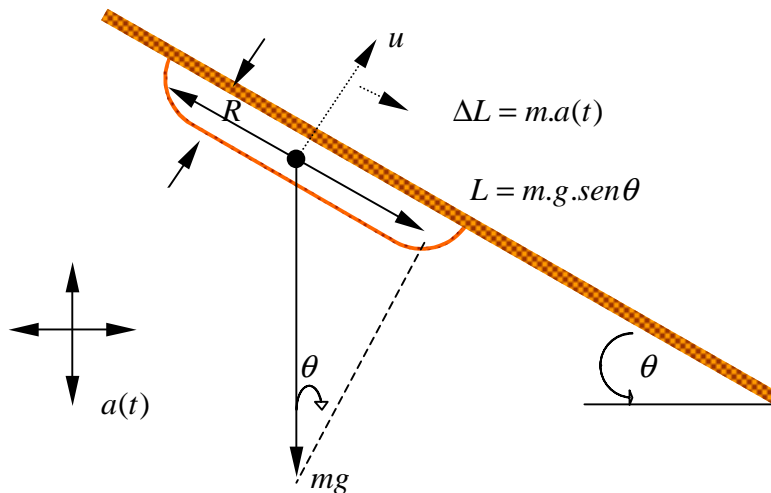


Figura 1: Modelo de un deslizamiento potencial con pendiente constante mostrando la interacción de la carga gravitacional (L), la fuerza resistente (R) y la aceleración sísmica del lugar ($a(t)$). La pendiente tiene una inclinación θ ; el bloque deslizante tiene un espesor (h). El deslizamiento potencial tiene una masa igual a (m) y (g) es la aceleración debida a la gravedad.

3.1.1 Factor de Seguridad (FS):

En general se puede expresar la estabilidad estática del talud (factor de seguridad, FS) como la relación entre la máxima resistencia del material del talud (R_{\max}) y la carga (L).

$$FS = \frac{R_{\max}}{L} \quad (1)$$

Si $L < R_{\max}$, el talud se encuentra en equilibrio (estable); si $L > R_{\max}$, el talud se encuentra fuera de equilibrio (inestable) y el desplazamiento puede ocurrir. Si $L = R_{\max}$, el talud se encuentra en un estado crítico en el cual un pequeño incremento en L o decremento de R hace que el talud esté sometido a un desplazamiento permanente. Se ha notado que el término “desplazamiento permanente” se usa como una definición del estado crítico más que el término “falla”. Esta distinción reconoce que un desplazamiento finito importante puede preceder a un desplazamiento real de la superficie de falla.

Jibson, (1994), propuso la siguiente formulación para calcularlo:

$$FS = \frac{c'}{\gamma \text{sen} \theta} + \frac{\tan \phi'}{\tan \theta} - \frac{m \gamma_w \tan \phi'}{\gamma \tan \theta} \quad (2)$$

dónde,

ϕ' , es el ángulo de fricción efectivo; c' , es la cohesión efectiva; θ , es el ángulo de talud; γ , es el peso unitario del material del talud; γ_w , es el peso unitario del agua; t , es el espesor normal a la superficie de falla plana y m , es la proporción de la superficie de falla plana que está saturada.

En la ecuación (2), el primer término corresponde al componente cohesivo, el segundo al componente friccionante y el tercer término es una reducción del esfuerzo debido a la presión de poros. En las condiciones de calibración del modelo realizada por Jibson (1998), la presión de poros no se incluye porque durante un sismo, el comportamiento de los materiales del talud es no drenado ya que el exceso de presión de poros inducido por la deformación dinámica de la columna de suelo no puede disiparse por la corta duración del movimiento.

3.1.2 Aceleración crítica (A_c):

Para considerar una condición dinámica (sísmica) en este análisis debe considerarse un paso más. Durante un sismo las ondas pasan a través del talud generando un campo de aceleraciones $a(t)$, que impone una fuerza adicional sobre la masa m del deslizamiento potencial. Durante el tiempo del fuerte movimiento, se induce una fuerza cambiante y esporádicamente incrementa la carga hacia abajo del talud. Si esta fuerza sísmica es bastante grande, la carga total hacia abajo sería $L + m.a(t)$ que puede exceder la máxima resistencia y el talud sufrirá un desplazamiento. Se expresa este nivel de movimiento del suelo en términos de una aceleración crítica A_c , que es la aceleración sísmica que multiplicada por la masa es igual a la diferencia entre la máxima resistencia y la carga gravitacional. . Introduciendo el factor de seguridad se obtiene la siguiente expresión para el cálculo de la aceleración crítica:

$$A_c = (FS - 1)g \cdot \text{sen} \theta \quad (3)$$

Donde g es la aceleración debida a la gravedad y θ es el ángulo (llamado ángulo de empuje) medido desde la horizontal hasta el centro de gravedad del movimiento del primer bloque del deslizamiento potencial. La aceleración crítica es pues la mínima aceleración del suelo requerida para superar la máxima resistencia del talud deslizante ($FS=1$). Para que se produzca un deslizamiento en una pendiente particular, la aceleración del suelo debe exceder la aceleración crítica, A_c , para un intervalo de tiempo finito. De aquí en adelante se usará la aceleración crítica como una medida numérica de la estabilidad del talud y por tanto de la susceptibilidad a que se produzca un deslizamiento inducido por un sismo.

3.2 Cálculo del desplazamiento de Newmark para un acelerograma concreto

Como se ha visto en el apartado anterior, se define la aceleración crítica como aquella para la cual se llega al estado crítico de inestabilidad, o sea un factor de seguridad al deslizamiento $FS=1$ en un análisis pseudoestático. Si esta fuerza inercial fuera constante en el tiempo, en un cálculo estático se finalizaría el inicio del movimiento de caída pero la aceleración es ondulatoria, es decir, sus picos se convierten en acciones de pulsación.

El análisis de Newmark calcula el desplazamiento de un deslizamiento (representado por un bloque rígido) bajo la acción de un movimiento sísmico. El desplazamiento, u , está calculado para dos entradas: La aceleración crítica Ac , que se ha calculado previamente y un sismograma de un movimiento fuerte, donde está registrada la aceleración del suelo en función del tiempo $a(t)$. Si la $|a(t)| < Ac$, el bloque deslizante es estacionario relativo a la pendiente, cuando la amplitud del movimiento supera la aceleración crítica, el bloque se ve afectado por el desplazamiento inducido por la pulsación de toda la fracción que supera la aceleración crítica. Se llama desplazamiento de Newmark (D_n) a la doble integración de la parte del acelerograma que supera el límite de la aceleración crítica. Con este cálculo se cuantifica el exceso de energía acumulada respecto a la condición de equilibrio.

El criterio de rotura o inicio del movimiento se establece con un límite de D_n que puede acumular la masa como máximo hasta salir de la condición de equilibrio en reposo. El valor crítico de desplazamiento puede variar extensamente, dependiendo del mecanismo de falla del talud (caída de roca, hundimiento, deslizamiento de bloque, etc.), la litología, la geometría del talud y la historia previa del movimiento del talud. Para cuantificar este parámetro para aplicación regional, se puede asignar un valor de 10 cm como desplazamiento crítico de deslizamientos coherentes; las caídas de roca y otros desprendimientos, involucran un componente significativo de falla tensional, un mecanismo más quebradizo, por lo cual el desplazamiento crítico es bajo. Así se ha asumido un desplazamiento crítico de 2 cm para deslizamientos por desprendimientos.

3.3 Estimación de la probabilidad de deslizamiento.

Los valores obtenidos para el desplazamiento de Newmark pueden asociarse a un porcentaje de superficie deslizada aplicando la curva de probabilidad de deslizamiento representada en la figura 2, propuesta por Jibson (Jibson et al., 1998) a partir de una regresión multivariable ajustada con datos de deslizamientos observados durante el sismo de Northridge del año 1994, ecuación 7:

$$P(f) = 0.274 \left[1 - \exp(-0.052 D_n^{1.663}) \right] \quad (7)$$

donde,

$P(f)$, es la proporción de celdas unitarias del deslizamiento;

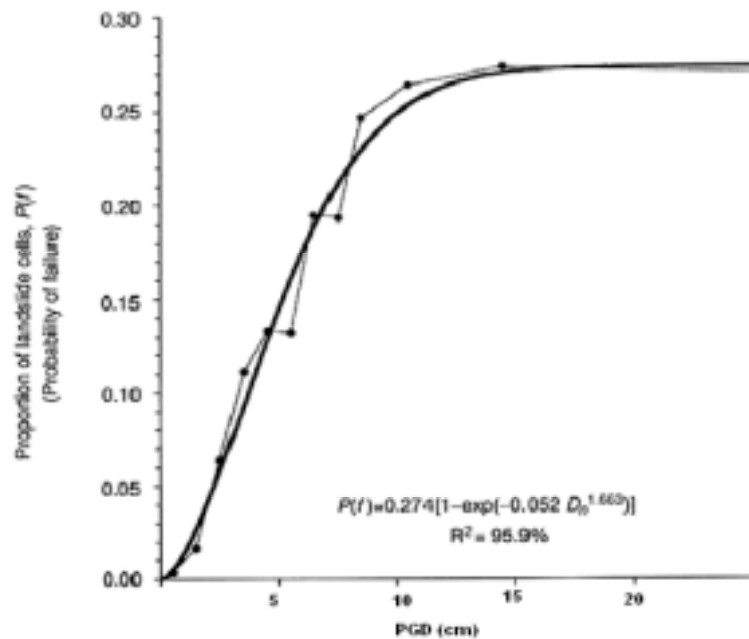


Figura 2: Curva de probabilidad de deslizamiento en función del desplazamiento de Newmark.

Esta expresión puede ser usada con diferentes condiciones de movimiento del suelo para predecir la probabilidad de falla de deslizamientos en función de la cuantificación de los desplazamientos de Newmark.

4. APLICACIÓN A ANDORRA.

4.1 Presentación de la zona de estudio.

El Principado de Andorra es un país montañoso de 468 km² situado en el centro de los Pirineos. La mayor parte del territorio tiene altitudes superiores a los 1800 m. La capital del Principado de Andorra, Andorra la Vella está ubicada en el fondo de un valle de origen glaciar a una altitud de 1000 m, la zona de estudio se centra en el Solà d'Andorra (figura 3), vertiente rocosa muy escarpada formada principalmente por granodioritas (bloques de entre 0.5 y 15 m³) y corneanas (bloques de entre 0.02 i 1 m³ de volúmen) con



Figura 3: Aspecto general del Solà d'Andorra la Vella y Solà de Nadal, al pie de la ciudad de Andorra la Vella.

una actividad importante de desprendimientos (Copons, 2004).

4.2 Deslizamientos más frecuentes en la zona de estudio.

Como deslizamiento se considera cualquier desplazamiento del terreno que constituye una ladera o escarpe, hacia el exterior de la misma y en sentido descendente. Los deslizamientos pueden originarse tanto en una formación superficial más o menos potente, como en un substrato rocoso competente, así como en una combinación de ambos (López. C., 2001). Para el presente trabajo se han tenido en cuenta las descripciones y clasificaciones propuestas por Corominas y Yagüe (1997). Los deslizamientos predominantes en la zona de estudio son de cuatro tipos básicos en función de sus dimensiones, mecanismo de propagación y los factores detonantes de los mismos. Los tipos de deslizamientos más frecuentes son los desprendimientos (caídas de bloques rocosos y desprendimientos de cornisas), grandes deslizamientos (gran parte de los deslizamientos de grandes dimensiones se generan en el momento de la retirada de los glaciares que ocupaban los valles principales de Andorra, por lo que los movimientos actuales del terreno suelen ser reactivaciones totales o parciales de estos grandes deslizamientos), las corrientes de derrubios (se observan múltiples corrientes de derrubios en la zona de estudio, los más grandes están situados en la confluencia de grandes corredores y torrenteras con los fondos de los valles principales) y los movimientos superficiales del terreno (pequeñas corrientes de derrubios que suceden en suelos saturados después de lluvias extremas).

4.3 Aplicación del método de Newmark.

4.3.1 Consideraciones geológicas y geotécnicas.

Se dispone de un mapa geológico en forma digital a escala 1:50000 con la información básica de todo el territorio de Andorra (CRECIT, 2002), que entrega gran parte de los elementos necesarios para el análisis preliminar de la peligrosidad sísmica de deslizamientos inducidos por terremotos.

Las litologías del substrato rocoso y de las formaciones superficiales de las laderas quedan individualizadas, según el mapa geológico, en cinco categorías fundamentales que son: (a) rocas masivas calcáreas, (b) pizarras grises con intercalaciones calcáreas, (c) margocalcáreas y pizarras violáceas, (d) granodioritas con biotita, y (e) intercalaciones de calcáreas y pizarras.

Para tener una visión de la estimación de las propiedades mecánicas de estas litologías, se ha realizado una revisión bibliográfica dirigida a obtener las propiedades mecánicas de cohesión (c) y ángulo de fricción interna (ϕ), que se usarán posteriormente en el cálculo del factor de seguridad de las laderas. Como resultado de la revisión bibliográfica se estiman los parámetros de resistencia para las cinco formaciones geológicas de Andorra, indicados en la tabla 2.

LITOLOGÍA	PARÁMETROS DE RESISTENCIA	
	c (lbs/pie ²)	ϕ (°)
Rocas calcáreas	Variación 600.0 – 1200.0	32 – 40
	Media 900.0	36
Pizarras+calcáreas grises	Variación 306.0 - 430.0	32 – 40
	Media 368.0	36
Margocalcareas y pizarras violáceas	Variación 110.0 – 156.0	30 – 45
	Media 133.0	38
Alternancias de calcáreas y pizarras marrones	Variación 306.0 – 430.0	32 – 40
	Media 368.0	38
Granodioritas con biotita	2040	41

Tabla 2: Parámetros de resistencia estimados para las litologías del sector de estudio.

4.3.2 Cálculo de la aceleración crítica.

Con la ecuación (2) se calcula el factor de seguridad estático y con la ecuación (3) se obtiene la aceleración crítica para diferentes pendientes. En la tabla 3 se observa que las aceleraciones críticas disminuyen al aumentar la pendiente y aumentan al aumentar la cohesión del material.

PENDIENTE (°)	ACELERACIONES CRÍTICAS (g's)				
	R. calcáreas	Pizarras+calc.	Margocalcáreas	Calcáreas+pizarras	Granodioritas
10	0.81	0.60	0.60	0.60	1.26
20	0.45	0.40	0.35	0.40	0.85
30	0.25	0.20	0.20	0.20	0.45
40	0.10	0.01	0.06	0.01	0.25
45	-	-	-	-	0.20

Tabla 3: Valores de aceleraciones críticas obtenidas para las diferentes litologías y pendientes de la zona en estudio.

4.3.3 Sismicidad de Andorra.

En los Pirineos, la mayor actividad sísmica se sitúa en la parte occidental de la cordillera. En el año 1373 tuvo lugar un sismo destructor en una amplia zona de la Ribagorça con una intensidad epicentral VIII-IX (Olivera et al., 1994a). En 1427 y 1428 tuvo lugar en el Pirineo oriental una serie sísmica con intensidades máximas entre VIII-IX y IX (Olivera et al., 1994b) que afectó a las comarcas de la Selva, el Ripolles y la Garrotxa. El terremoto de 1428 es uno de los mayores eventos sísmicos que ha sacudido a la región con la destrucción de pueblos, castillos, iglesias, etc. y más de 800 víctimas (Banda y Correig, 1984). En el Pirineo Central, en el año 1923 tuvo lugar un sismo de magnitud 5.6 que causó daños en el valle de Aran y se percibió en Andorra con intensidad V (Susagna et al., 1994).

En el año 1970 tuvo lugar en Andorra una crisis sísmica importante el 14 y 16 de marzo y el 5 de abril con intensidades epicentrales de V-VI (Susagna et al., 1999). De la sismicidad instrumental de los últimos 16 años se han localizado en Andorra y sus alrededores unos 40 sismos de magnitud comprendida entre 2 y 3.4 (SGC-ICC, 1984-2000).

Para su utilización en el cálculo de los desplazamientos de Newmark se han seleccionado tres acelerogramas cuyo espectro se ajustara al propuesto para la zona en el estudio de peligrosidad sísmica para un período de retorno de 475 años y amortiguamiento del 5% (Secanell et al. 2003), correspondiendo a un PGA de 0,1g.

4.3.4 Cálculo de los desplazamientos de Newmark.

Considerando los tres acelerogramas seleccionados se han calculado los desplazamientos de Newmark con las aceleraciones críticas calculadas en la tabla 3, teniendo en cuenta que las aceleraciones máximas de los tres sismos tienen que cumplir la condición $A_{máx} > A_c$; necesaria para aplicar el método de Newmark, esta condición solo se cumple para pendientes de 40°. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.

No.	Sismo	Amax(g's)	Duración (s)	Distancia epicentral (km)	Aceleraciones críticas (g's) y desplazamientos (cm)		
					0.01 ⁽¹⁾	0.06 ⁽²⁾	0.10 ⁽³⁾
1	0207ya	0.120	13	8	0.730	0.067	0.001
2	0428za	0.076	25	23	4.069	0.005	0
3	0549ya	0.082	23	30	4.982	0.036	0

(1)Pizarras+calcáreas. ;(2) Margocalcáreas. ;(3) Rocas calcáreas.

Tabla 4: Desplazamientos de Newmark en cm calculados a partir de los sismos seleccionados y una pendiente de 40°.

Teniendo en cuenta que la aceleración crítica $A_c=0.01g$ es la que da valores de desplazamientos del orden de los centímetros, posibles para Andorra, se adopta ésta como la más crítica.

Aplicando la ecuación 7 propuesta por Jibson (1998), se estima la probabilidad de falla de los deslizamientos como función de los desplazamientos de Newmark calculados. Para los valores considerados de movimiento sísmico correspondiente a una estimación realizada para un período de retorno de 475 años no hay peligro, razonablemente, de deslizamientos en laderas con pendientes menores que 40°. Para pendientes mayores las evaluaciones aquí realizadas muestran una probabilidad no despreciable de ocurrencia de deslizamientos, correspondiendo aproximadamente a una superficie entre 0.8% y 13% de la superficie total presente con esta pendiente.

5. CONCLUSIÓN.

Como resultado más importante destacamos que para el nivel sísmico de 0.1g esperable en Andorra, se obtiene una probabilidad de deslizamiento significativa que representa una superficie entre el 1%-13% de la superficie total para pendientes superiores a 40° en litologías formadas por calcáreas y pizarras.

Recientemente se ha publicado un estudio de peligrosidad de deslizamientos de ladera en el Solà d'Andorra la Vella (Copons, 2004). Una parte de este estudio ha consistido en una cartografía de las zonas de desprendimientos y el análisis de la susceptibilidad de alcance del deslizamiento. Como continuación del trabajo aquí propuesto se pretende extender la metodología a toda la zona del Solà d'Andorra la Vella y obtener un mapa de probabilidad de deslizamientos activados por terremotos a partir del cruce de datos de la distribución de deslizamientos en la zona con valores de desplazamientos de Newmark.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Banda, E. y Correig, A. M. (1984). "The Catalan earthquake of february 2,1428". Engineering Geology, 20. 89-97. Elsevier Science Publishers B. V.
- Copons, R. (2004). "Avaluació de la perillositat de caigudes de blocs a Andorra la Vella (Principat d'Andorra)". Tesis doctoral, UB, Barcelona, pp: 244.
- Coral, H. (2002). "Utilización de métodos experimentales y de simulación numérica para la microzonificación sísmica de áreas urbanizadas en Andorra". Tesis Doctoral, UPC, Barcelona. 207pp.
- Corominas, J. y García Yagüe, A. (1997). "Terminología de los movimientos de ladera". IV Simposio Nacional de Taludes y laderas inestables, edit. Granada, pp. 1051-1072.
- CRECIT (2002). "Mapa geològic d'Andorra 1:50.000". Dipòsit legal: AND.183-2002. ISBN. 99920-0-291-3
- Jibson, R.W. (1993). "Predicting earthquake-induced landslide displacements using Newmark's sliding block analysis" Transportation Research Record, no. 1411, pp. 9-17.
- Jibson, R. W., Harp, E. L., and Michael, J. A. (1998). "A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps: an example from the Los Angeles, California, area". Science for a changing world (USGS).
- Keefer, D.K. (1984). "Landslides caused by earthquakes". Geological Society of America Bulletin, v. 95, pp. 406-421.
- Lopez, C. (2001). "Zonificación del territorio según la peligrosidad de deslizamientos". V Simposio sobre taludes y laderas inestables. Vol. I, pp. 229-254.
- Newmark, N. M. (1965). "Effects of Earthquake on Dams and Embankments". Geotechnique, vol 15 No. 2, 1965. pp139-159.
- Olivera, C., Riera, A., Lambert, J., Banda, E., Alexandre, P. (1994a). "Els Terratrèmols de l'any 1373 al Pirineu: efectes a Espanya i França". Monografies núm 3, pp. 220, Servei Geològic de Catalunya. Barcelona.
- Olivera, C., Riera, A., Martinez, B. y Roca, A. (1994b). "Revision of the 1427 earthquakes in the Eastern Pyrenees. Delimitation of the epicentral area and intensity assessment for the

March 15 and May 15 events”. Historical Investigation of European Earthquakes, 2, pp. 169-179.

- Secanell, R.; Irizarry, J.; Susagna, T.; Martin, C.; Goula, X.; Combes, P. y Fleta, J. (2003). “Evaluación unificada de la peligrosidad sísmica alrededor de la frontera entre Francia y España”. Proceed. 2º Congreso Nac. de Ing. Sísmica, Málaga. 8pp.
- SGC-ICC, (1984-2000). Boletines Sismológicos. DPTOP Generalitat de Catalunya. Institut Cartogràfic de Catalunya. Barcelona.
- Susagna, T., Roca, A., Goula, X. and Batlló, J. (1994). “Analysis of macroseismic and instrumental data for the study of the November 19, 19-23 earthquake in the Aran Valley (Central Pyrenees)”. Natural Hazards 24(10), pp. 7-17.
- Susagna, T. y Goula, X. (1999). ”Atles Sísmic de Catalunya. Volumen 1: Catàleg de sismicitat”. Institut Cartogràfic de Catalunya. Barcelona, pp 436.