

1
2
3
4
5 **ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES SUBVERTICALES**
6 **EN MARGAS**
7
8

9 **María José GARCÍA¹, Mar PIEDECAUSA, José DELGADO, Roberto TOMÁS y**
10 **Miguel CANO**

11
12 ¹ Dpto. Ingeniería de la Construcción, Obras Públicas e Infraestructura Urbana
13 Escuela Politécnica Superior
14 Universidad de Alicante
15 Ap. Correos 99, 03080 Alicante
16
17
18

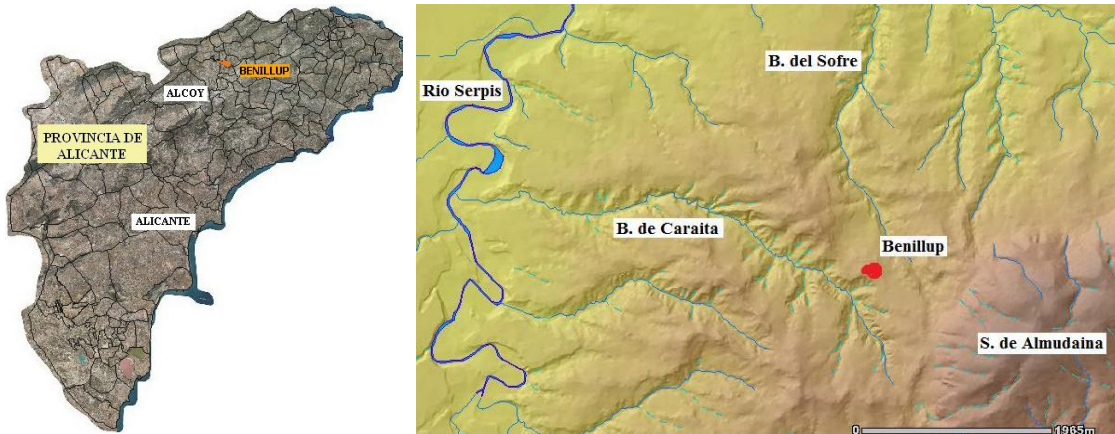
19 **RESUMEN**
20

21 *El núcleo urbano de Benillup (N Alicante) se sitúa en las inmediaciones de los valles de*
22 *los ríos Caraíta y Xofre, ambos afluentes del río Serpis. El medio se caracteriza por*
23 *taludes de pendientes subverticales en materiales margosos. Dichos taludes son estables*
24 *en condiciones secas pero se desencadenan numerosas inestabilidades (de tipo*
25 *desprendimiento, deslizamiento y/o flujo en suelos) tras episodios de lluvias. En el*
26 *presente trabajo se analiza el comportamiento geotécnico de estos materiales y la*
27 *estabilidad de varios taludes del sector considerando para ello condiciones tanto*
28 *subsaturadas como saturadas y la influencia que el agua de infiltración tiene en los*
29 *factores de seguridad resultantes. Los resultados ponen de manifiesto las limitaciones del*
30 *uso de parámetros resistentes medidos en ensayos estándar (c/c' y ϕ/ϕ') para estos*
31 *taludes y la necesidad de establecer el comportamiento resistente en condiciones*
32 *subsaturadas y saturadas para poder analizar/diseñar taludes estables a largo plazo.*
33
34
35
36

37 **1. INTRODUCCIÓN**
38

39 Benillup es un pequeño municipio situado al N de la provincia de Alicante. Está situado en la
40 comarca del Comtat, en lo que se llama los *Valles de Alcoy*, al NE de Alcoy (Figura 1). El
41 entorno del casco urbano está constituido por una serie de valles, profundamente encajados,
42 excavados en materiales margosos de edad Mioceno Superior. Benillup se encuentra justo al

43 N de la cabecera de uno de ellos, el barranco de Caraíta, y al noreste tiene próximo el barranco
44 del Sofre (o Xofre).
45



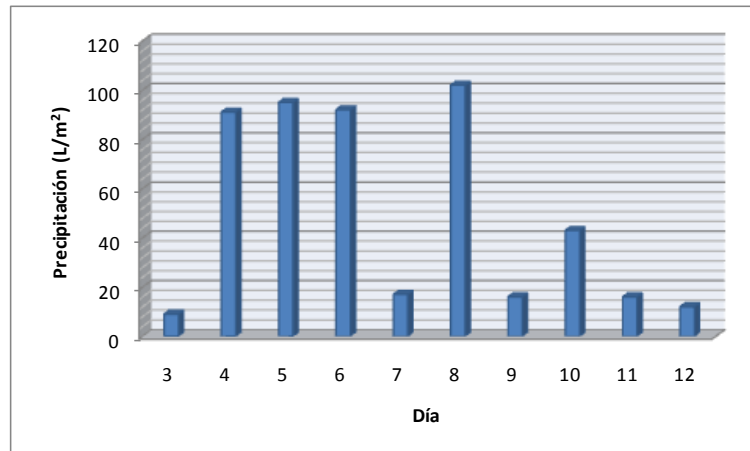
46
47 Figura 1. Localización geográfica del área de estudio (García, 2009).
48

49 En estos barrancos no circula agua la mayor parte del año, excepto tras periodos lluviosos, en
50 que discurre cierto caudal. Como consecuencia de la acción erosiva de estos torrentes, así
51 como de procesos de vertientes, las laderas de los barrancos se caracterizan por tener
52 pendientes elevadas, frecuentemente superiores a 35°. A pesar de ello, los taludes son, en
53 general, estables mientras el terreno se encuentra en estado seco. Sin embargo, después de
54 periodos de lluvias, se producen muchas inestabilidades. Las mismas suelen ser flujos y/o
55 deslizamientos en las margas. La formación de grietas de desecación ayuda a definir cuñas de
56 material que luego deslizan al saturarse en agua.

57
58 En el año 2004 hubo un periodo de lluvias de especial intensidad entre los días 3 y 12 de
59 diciembre, cuando se registraron precipitaciones de casi 500 l/m² (Figura 2). Como
60 consecuencia de dichas lluvias se produjeron numerosas inestabilidades en las laderas de
61 todos los barrancos del entorno de Benillup, siendo especialmente importantes las que
62 afectaron al propio núcleo urbano, donde desapareció parte de un bancal al deslizar la ladera
63 del barranco de Caraíta, quedando algunas viviendas muy próximas al borde del mismo
64 (Figura 3). La alarma que ello causó fue notable. En otoño de 2007 se volvió a reproducir la
65 misma situación, de manera que las viviendas se encuentran aún más cerca del escarpe.

66
67 En el presente trabajo se presentan los resultados preliminares de una investigación en curso
68 sobre la estabilidad de los taludes margosos de esta zona, en la cual se está analizado el efecto
69 que tiene la infiltración del agua de lluvia en el estado de esfuerzos y en la resistencia al corte
70 del terreno. Para ello se hará uso de la mecánica de suelos subsaturados (Fredlund et al., 1978)
71 y de software especialmente desarrollado para este fin (Baum et al., 2008). Los resultados
72 obtenidos se compararán con los obtenidos mediante software estándar en el análisis de
73 estabilidad de taludes.

74



75
76
77
78

Figura 2. Registro de precipitaciones en Benillup durante el episodio de Diciembre 2004 (García, 2009).



79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90

Figura 3. Estado de la ladera de Benillup poco después del periodo de lluvias.

2. METODOLOGÍA

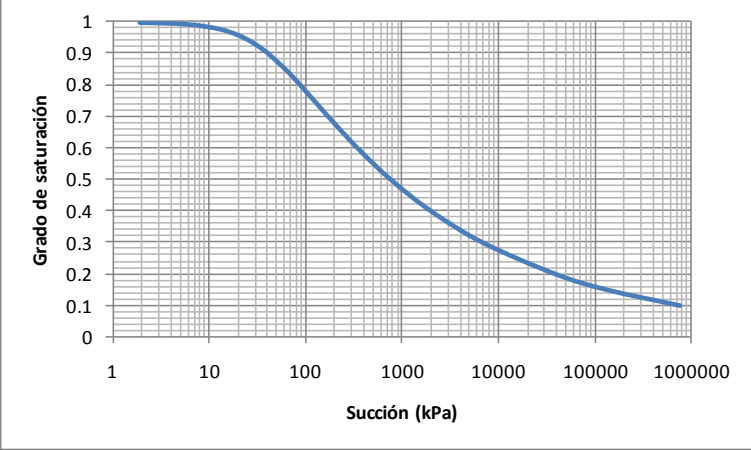
La resistencia al corte de suelos subsaturados ha sido objeto de estudio por parte de diversos autores en la segunda mitad del siglo XX. Los trabajos de Fredlund y colaboradores (Fredlund et al., 1978; Fredlund, 2000) han permitido establecer un marco teórico para el estudio de la resistencia al corte de suelos en condiciones subsaturadas. De acuerdo con estos autores, dicha resistencia viene dada por la expresión:

91
$$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi^b \quad (1)$$

92
 93 Donde c' es la cohesión determinada en presiones efectivas, ϕ' es el ángulo de rozamiento
 94 interno determinado en presiones efectivas, σ es la tensión neta en el terreno (debida al
 95 peso del terreno), u_a es la presión de la fase gaseosa en el suelo, u_w es la presión del agua
 96 y ϕ^b es el ángulo que expresa el incremento de resistencia al corte debido al aumento de la
 97 succión de la matriz (ψ , o diferencia $u_a - u_w$). Para un suelo saturado, $u_a = 0$ y $\phi^b = \phi'$, de
 98 manera que la ecuación 1 se transforma en la conocida expresión de Mohr-Coulomb.

99
 100 La anterior expresión pone de manifiesto que en el estado subsaturado existe una
 101 contribución por parte de la succión de la matriz a la resistencia al corte del suelo y que
 102 cuanto mayor sea dicha succión, mayor será la resistencia del terreno. Esta succión es
 103 función, entre otros parámetros, de la granulometría del suelo (diámetro de los poros) y
 104 del contenido en agua del mismo. La Figura 4 presenta la curva característica suelo-agua
 105 de una muestra tomada en el área de estudio, donde se puede observar cómo disminuye la
 106 succión para valores crecientes de humedad en la muestra analizada.

107



108
 109
 110 Figura 4. Curva característica suelo-agua de la muestra Z2.

111
 112 El cálculo de la succión de la matriz de suelo se ha determinado mediante el software
 113 TRIGRS (Baum *et al.*, 2008). El mismo calcula los cambios en las presiones intersticiales
 114 que se producen como consecuencia de la lluvia y la infiltración de parte de este agua.
 115 Los modelos de infiltración implementados en TRIGRS se basan en la solución de
 116 Iverson (2000). En ellos se considera la existencia de un nivel freático en profundidad,
 117 una zona de capilaridad y una zona subsaturada. Al producirse la precipitación, el agua
 118 comienza a infiltrar en el terreno, a una velocidad que es función de las propiedades
 119 hidráulicas del mismo, haciendo variar la humedad del suelo con el tiempo. Dicho suelo,
 120 mientras está subsaturado actúa reteniendo parte del agua que accede a él y cediendo otra
 121 cantidad, la cual desciende hasta acumularse en el nivel freático subyacente. Si la

122 duración e intensidad del episodio lluvioso lo permite, el nivel freático ascenderá,
123 saturando el terreno inmediatamente sobre él. El exceso de precipitación, que el terreno
124 no es capaz de infiltrar, se considera que se desplaza a las celdas adyacentes, sumándose a
125 la lluvia que pudiera caer sobre ellas.

126
127 TRIGRS divide el territorio en áreas cuadradas (píxeles) y calcula, para cada una, cómo
128 varía en el tiempo el estado de esfuerzos en la columna de suelo y su efecto en el valor
129 del factor de seguridad a diversas profundidades. La expresión empleada para calcular
130 dicho factor es:

$$132 \quad FS = \frac{c' - \psi(Z,t)\gamma_w \tan \phi'}{\gamma Z \sin \delta \cos \delta} + \frac{\tan \phi'}{\tan \delta} \quad (2)$$

133
134 Donde el significado de los parámetros es el mismo que en la ecuación 1. Nótese que se
135 considera que la succión (ψ) es una variable que depende de la profundidad y del tiempo.
136 Además, esta expresión tiene en cuenta el criterio de Vanapalli y Fredlund (2000), según
137 el cual la relación entre ϕ^b y ϕ' viene dada por:

$$139 \quad \begin{aligned} \tan \phi^b &= \chi \tan \phi' \\ \chi &= (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) \end{aligned} \quad (3)$$

140
141 Donde θ es la humedad volumétrica correspondiente a la succión ψ , de acuerdo con la
142 curva característica del suelo en cuestión (Figura 4), y θ_s y θ_r corresponden a las
143 humedades volumétricas para los estados saturado y residual.

144
145

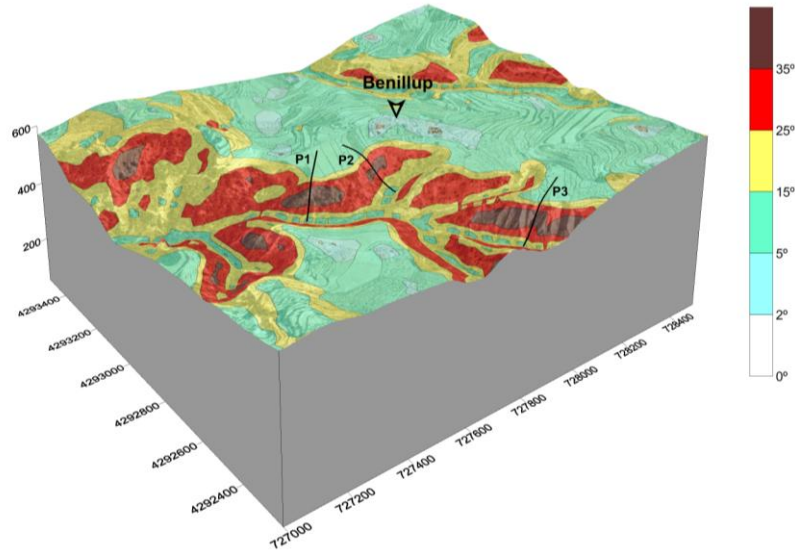
146 3. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

147
148 La metodología descrita se ha aplicado a un área piloto de 1.5 x 1.2 km centrada
149 aproximadamente en el casco urbano de Benillup (Figura 5). Desde un punto de vista
150 geológico, toda el área de estudio está constituida por margas de edad Mioceno Superior,
151 conocidas localmente como *Tap*, dispuestas (sub)horizontales. Tan sólo en los fondos de
152 los barrancos existen materiales aluviales, producto de arrastres y procesos de vertientes,
153 estando constituidos por una mezcla de margas y cantos de naturaleza caliza procedentes
154 de los relieves calizos próximos.

155
156 Se han empleado modelos digitales del terreno (MDT) de diversa resolución. Los
157 resultados aquí presentados corresponden a uno con píxeles de 25m de lado. A partir de él
158 se ha calculado el mapa de pendientes (Figura 5) y el mapa hidrológico (sentido de flujo
159 del agua), necesarios para el análisis posterior.

160
161 Las propiedades geotécnicas se han determinado a partir de muestras superficiales
162 tomadas *in situ*. La Tabla 1 presenta las principales propiedades geotécnicas que se han

163 empleado para el presente trabajo. En la Figura 4 se ha presentado la curva característica
 164 suelo-agua obtenida para esta zona.
 165



166
 167
 168 Figura 5. Pendientes del área de estudio. P1 a P3 son algunos de los perfiles analizados en secciones 2D.
 169

Propiedad		Benillup – Zona 2
Clasificación		CH
Límite Líquido / I.P. (%)		59 / 30
Densidad aparente (kg/m ³)		1900
Cohesión (kPa)	c	9.8
	c'	0.98
Áng. rozamiento interno (°)	φ	22.8
	φ'	25.3
Permeabilidad saturada (m/s)		9.0 10 ⁻⁶
Difusividad (m ² /s)		1.1 10 ⁻⁵

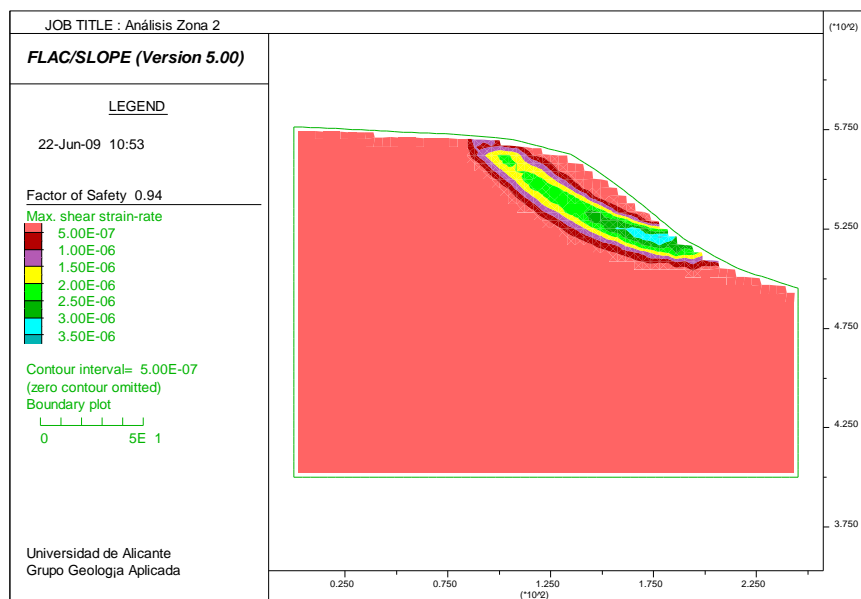
170
 171 Tabla 1. Resumen de las propiedades geotécnicas de las margas de Benillup (García, 2009).
 172
 173

174 4. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

175
 176 El análisis de estabilidad se ha efectuado mediante los programas TRIGRS, anteriormente
 177 descrito, y FLACSlope (ITASCA, 2005), que emplea el modelo de Mohr-Coulomb.
 178

179 FLACSlope es un programa de diferencias finitas que trabaja con secciones 2D. Para su
 180 uso se han definido diversas secciones en el área de estudio (Figura 5). Ninguna de ellas
 181 pasa sobre el casco urbano al objeto de no tener que estimar las cargas aplicadas por las
 182 edificaciones. En los cálculos se han empleado los parámetros resistentes determinados

183 tanto en presiones efectivas como totales para así poder estudiar la estabilidad en el caso
 184 de suelos secos (antes de una tormenta) y de suelos completamente saturados (estado tras
 185 una tormenta de larga duración). Los factores de seguridad (FS) obtenidos para el caso
 186 seco varían entre 0.78 y 1.12, mientras que en el caso saturado oscilan entre 0.66 y 0.94.
 187 La Figura 6 presenta los resultados obtenidos con uno de los perfiles, el cual se puede
 188 considerar representativo de la mayoría de los resultados obtenidos. En él se observa que
 189 la superficie de máxima deformación es profunda. En la práctica esto tan sólo se ha
 190 reconocido al sur de Benillup, en la margen opuesta del barranco de Caraíta.
 191



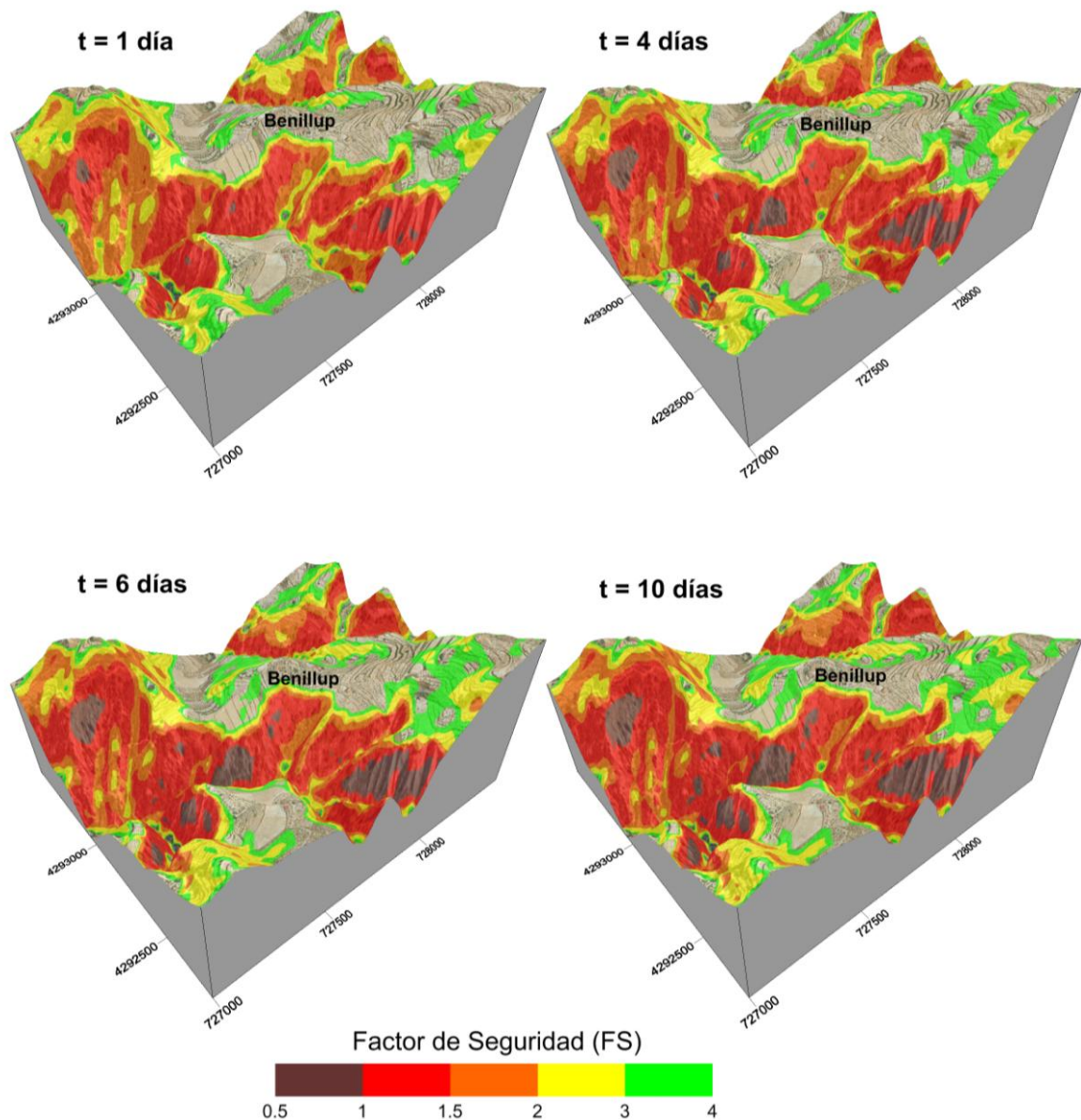
192
 193 Figura 6. Resultados del análisis 2D del perfil P3. Estado saturado.
 194

195 El análisis de estabilidad con TRIGRS se ha hecho simulando el episodio lluvioso de
 196 2004 (Figura 2). Para dicho análisis se ha considerado una profundidad máxima de
 197 cálculo de 7m, coincidente con el límite detectado por Delgado et al. (2006) entre las
 198 margas superficiales, meteorizadas, y las margas profundas inalteradas presentes en la
 199 zona. Se ha considerado que esta profundidad constituye un nivel donde se acumulará el
 200 agua de infiltración, habida cuenta de la menor permeabilidad del nivel inalterado.
 201

202 Antes de la tormenta, según los resultados obtenidos con TRIGRS, FS está comprendido
 203 entre 1 y 2 en gran parte de las laderas del barranco de Caraíta, variando entre 1.25 y 2 en
 204 la ladera sobre la que se sitúa Benillup. Tan sólo en dos zonas, situadas respectivamente
 205 al NW y SE del pueblo, han resultado valores inferiores a 1.
 206

207 La Figura 7 presenta la variación de FS para cuatro momentos diferentes del periodo de
 208 lluvias analizado. Transcurridas 24 horas desde el comienzo de las lluvias, los FS

209 calculados disminuyen respecto de los valores iniciales. Las mencionadas dos zonas con
210 $FS < 1$ aumentan de tamaño. Aparece una tercera zona en las proximidades al casco
211 urbano (al W), mientras que la ladera sobre la que se sitúa el pueblo mantiene valores
212 superiores a 1. Transcurridos 4 días comienzan a resultar FS inferiores a la unidad en la
213 ladera del pueblo, en su sector occidental. Esta inestabilidad crece de tamaño con el
214 tiempo (T = 6-10 días).
215



216
217
218
219

Figura 7. Variación espacio-temporal del factor de seguridad en el área de estudio.

220 Estos resultados son congruentes con los datos conocidos, que indican que hubo
221 inestabilidades en ambos márgenes del barranco de Caraíta y a lo largo del mismo.
222 Respecto del área más próxima al pueblo, los mayores problemas se produjeron al W del
223 mismo (Figura 3), en sintonía con los resultados de la modelización, aunque también
224 hubo problemas al SE del pueblo, algo que el modelo en su estado actual no es aún capaz
225 de reproducir.

226
227

228 5. CONCLUSIONES

229

- 230 - Se ha estudiado la estabilidad de los taludes del área de Benillup (Alicante)
- 231 empleando para ello un modelo que tiene en cuenta la succión de la matriz del suelo y
- 232 su contribución a la resistencia al corte.
- 233 - El análisis se ha hecho considerando un periodo de lluvias real, del que se dispone de
- 234 datos que permiten contrastar los resultados.
- 235 - Los resultados del modelo en su estado actual permiten localizar las zonas donde las
- 236 inestabilidades fueron más frecuentes.
- 237 - Estos resultados se han comparado con los obtenidos a partir de software que no tiene
- 238 en cuenta la succión. En tal caso se ha obteniendo una peor correlación entre los
- 239 resultados y las condiciones del medio (estabilidad/inestabilidad en estado
- 240 seco/saturado).
- 241 - Los resultados ponen de manifiesto la importante contribución que la succión realiza
- 242 a la resistencia al corte del terreno. Una correcta caracterización de la misma, así
- 243 como un correcto control de ella, ayudaría al diseño de taludes estables a largo plazo.

244

245 REFERENCIAS

246

- 247 Baum, R.L., Savage, W.Z. and Godt, J.W., 2008. *TRIGRS—A Fortran Program for Transient Rainfall*
248 *Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis, Version 2.0*. U.S. Geological
249 Survey Open File Report 2008-1159, 75p.
- 250 Delgado, J., Peláez, J.A., Tomás, R., Estévez, A., López Casado, C., Doménech, C. y Cuenca, A.
251 (2006). Evaluación de la susceptibilidad de las laderas a sufrir inestabilidades inducidas por
252 terremotos: aplicación a la cuenca de drenaje del río Serpis (provincia de Alicante). *Revista de la*
253 *Sociedad Geológica de España*, 19,197-218.
- 254 Fredlund, D.G., 2000. The 1999 R.M. Hardy Lecture: Implementation of unsaturated soil mechanics
255 into geotechnical engineering. *Canadian Geotechnical Journal*, 37, 963-986.
- 256 Fredlund, D.G., Morgensten, N.R. and Widger, R.A., 1978. The shear strength of unsaturated soils.
257 *Canadian Geotechnical Journal*, 15, 313-321.
- 258 García, M.J., 2009. *Análisis de estabilidad de los taludes margosos del término municipal de benillup*
259 *(Alicante)*. Memoria Trabajo Fin de Carrera, Universidad de Alicante, 224 p.
- 260 ITASCA, 2005. *FLAC/Slope Version 5.0. User's guide*. ITASCA Consulting Group, Inc., 84 p.
- 261 Iverson, R.M., 2000. Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resources Research*, 36, 1897–
262 1910.

263 Vanapalli, S. K., and Fredlund, D.G., 2000, Comparison of different procedures to predict unsaturated
264 soil shear strength, in Shackelford, C.D., Houston, S.L., and Chang N.-Y. (eds.): *Advances in*
265 *unsaturated geotechnics*, American Society of Civil Engineers, Geotechnical Special Publication
266 99, 195–209.