

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

Atendiendo al trabajo presentado en esta memoria se pueden definir una serie de conclusiones según los siguientes aspectos:

- conclusiones generales de la aplicación del SIG en el análisis de susceptibilidad
- análisis de susceptibilidad a los deslizamientos superficiales
- análisis de susceptibilidad según el talud infinito en un gran deslizamiento
- perspectivas de futuro

Conclusiones generales de la aplicación de los SIG

Los procedimientos de análisis de susceptibilidad a la rotura de laderas utilizados en esta memoria aplicando un SIG permiten definir las conclusiones siguientes. Atendiendo a las ventajas se concluye:

- 1) La idoneidad (viabilidad) de utilizar un SIG para este tipo de trabajo dado que se utilizan datos georeferenciados.
- 2) La facilidad de obtención de factores o parámetros derivados de un MDE o de otros datos asimilables a un modelo de elevaciones (como por ejemplo una superficie interpolada).
- 3) La reproductibilidad de los resultados y la regionalización de algunos de los métodos utilizados.
- 4) La rapidez de obtención de factores derivados de un MDE, la rapidez de análisis y cálculo y la de obtención de los mapas de susceptibilidad finales.
- 5) La aplicación del formato raster para este tipo de análisis, sobretodo en lo concerniente a la derivación de modelos a partir del MDE y a una parte del cálculo de algunos de los análisis, es un factor clave para la aplicación de este tipo de procedimientos de estimación de la susceptibilidad. La combinación con el formato vectorial permite trabajar con mayor flexibilidad y tener opción a disponer de más información.

Atendiendo a los inconvenientes se definen las siguientes conclusiones:

- 1) La dependencia de los resultados del análisis a la disponibilidad, precisión y resolución de un buen MDE. Las imprecisiones o errores habidos en el MDE se arrastran desde los factores o variables derivados del MDE, pasando por el análisis hasta el mapa de susceptibilidad final.

- 2) La calidad de la información existente o de nueva creación para el análisis limita los resultados finales.
- 3) La aplicación del formato raster conlleva trabajar con unidades de análisis sin significado físico, y que, dependiendo de la resolución de la malla regular utilizada y del relieve topográfico de la zona a estudiar, pueden simplificar en exceso las características del relieve, a la vez que no adecuarse al fenómeno a analizar.
- 4) La derivación de ciertos parámetros del MDE como la pendiente de la ladera, resulta en rangos de valores que se sitúan en los valores medios, eliminando en gran medida los valores extremos (efecto soporte de geostatística). Esto limita los análisis debido a que se trabaja con valores promedios de algunas de las variables y no con todo el rango de valores posibles que se puede encontrar en la realidad.
- 5) Además de las limitaciones y errores comentados, los procedimientos utilizados no están exentos de otros errores que se pueden producir a lo largo de todo el proceso (digitalización, efectos de la rasterización, interpolación y ajuste, ponderación incorrecta, etc) y que deben tenerse presentes.

Análisis de susceptibilidad a los deslizamientos superficiales

El capítulo 3 de la presente memoria presenta el análisis de susceptibilidad a los deslizamientos superficiales mediante la técnica discriminante. Las siguientes conclusiones resumen lo expuesto en el citado capítulo.

- 1) La obtención automática de la mayor parte de los factores relacionados con la estabilidad de las laderas a deslizamientos superficiales, derivados de un MDE y la rapidez de este procedimiento es una gran ventaja del método presentado.
- 2) Los resultados de las funciones discriminantes son coherentes. Estas funciones no observan deslizamientos en los niveles poco susceptibles aumentando estos hacia los niveles de mayor susceptibilidad. Asimismo el índice de validación utilizado permite conocer la bondad de la predicción realizada.
- 3) La separación entre poblaciones (con y sin roturas) de las funciones discriminantes obtenidas no es marcada debido a tres aspectos: el uso de las variables derivadas (que tienen valores promedio) por un lado, la no definición previa de las celdas sin roturas (estables) por otro, y a la selección de la muestra utilizada de esta población. El primer aspecto se ha comentado en la cuarta conclusión atendiendo a los inconvenientes de la aplicación de un SIG al análisis de susceptibilidad. El segundo aspecto de la no definición de las celdas estables a priori, facilita el solape de las dos poblaciones estudiadas puesto que se pueden seleccionar celdas (laderas) sin roturas que pueden ser muy susceptibles, aunque todavía no han roto. Finalmente, en el último aspecto, al regionalizar el análisis, dado que éste es uno de los objetivos perseguidos, no todas las celdas sin roturas seleccionadas al azar para la muestra a analizar, pertenecen a laderas propiamente dichas. Y ello conduce al solape de las dos poblaciones analizadas.
- 4) Se pueden producir errores de asignación de celdas a niveles de susceptibilidad que no les corresponden debido a dos aspectos: la combinación lineal de variables, base del análisis

multivariante de tipo discriminante y la función discriminante, y la precisión y resolución del MDE utilizado.

- 5) Los resultados obtenidos son válidos sólo bajo la hipótesis de intensidad de lluvia distribuida de forma homogénea en todo el área de estudio.
- 6) Los resultados del análisis estadístico en cuanto a las distribuciones de las variables y al Análisis Factorial son semejantes con independencia del área de estudio. Las variables que precisan transformación son las relativas a la cuenca (ACUENCA, LONG, AFS y LFS). Estas mismas variables forman el primer factor en el Análisis Factorial junto con PENDM. El segundo factor siempre está constituido por la variable PEND y su transformada a función senoidal PENDS, la media de los modelos de insolación (INSOL) y en menor medida la variable PENDM. Finalmente, el tercer factor se encuentra constituido siempre por las tres variables relativas a la curvatura de la ladera (la general CURVAR, la longitudinal PERFIL y la transversal a la ladera PLA).
- 7) Por otro lado, la relación de las variables con la estabilidad según los resultados del análisis de contraste (análisis T-Tes y One-Way) indican que varía según el área de estudio y las dimensiones de los deslizamientos superficiales. A pesar de ello, en general, los resultados muestran que son las variables relativas a la pendiente (PEND, PENDS y PENDM) las más significativas junto con GROSOR en el caso de la Población de Lillet.
- 8) En las zonas de la Población de Lillet y Vallcebre favorecen la aparición de roturas de tipo superficial las pendientes de las laderas de rango medio, grosores importantes de formación superficial y presencia de ésta, en el caso de no utilizar la variable GROSOR, y laderas orientadas hacia el sur. Mientras que perfiles transversales convexos, altitudes elevadas y vegetación densa favorecen la estabilidad. Según el relieve del área de estudio las variables relativas a la cuenca (área, longitud, pendiente media) varían su relación con la estabilidad, aunque siempre están presentes en la función discriminante final.
- 9) Los análisis de sensibilidad realizados corroboran 4 aspectos. Primero la escasa influencia de la ponderación de las variables categóricas en los resultados finales del análisis. Ello es debido a que la susceptibilidad se estima a partir de la función discriminante, que a su vez, es una combinación lineal de varios factores, neutralizando la influencia de la ponderación realizada sobre alguno de éstos. Segundo, la notable influencia de la homogeneidad del área estudiada, en cuanto a su susceptibilidad a la rotura, en la estimación de la misma. Cuanto mayor sea la heterogeneidad de un área mayores serán las diferencias que se obtendrán del análisis comparando estos resultados con los obtenidos en una parte mucho más homogénea del área, sea ésta más o menos susceptible. Tercero, la gran capacidad discriminante de algunas variables (como GROSOR en la Población de Lillet) que aumentan la clasificación entre un 5 y un 10%. Creemos que variables como GROSOR, con su alta significancia estadística en relación con la estabilidad, son casos aislados de algunas áreas y pueden corresponder a la relación entre factores no disponibles como la litología con la estabilidad. Finalmente, la mejora que supone el utilizar la variable PENDS en lugar de PEND para evitar celdas erróneas en el nivel más susceptible. La variable PENDS simula mejor el comportamiento de la pendiente de la ladera en relación con la susceptibilidad a roturas de tipo superficial en ésta.
- 10) Por último, el tamaño de celda comparando las mallas de 15×15 m con las de 45×45 m no influye demasiado en los resultados del análisis de las dos zonas estudiadas, aunque sí que influye en los resultados de la relación entre las variables y la estabilidad. A pesar de

ello creemos más acertado utilizar la malla de 15 que se acerca más a las dimensiones del fenómeno analizado.

Análisis de susceptibilidad del deslizamiento de Vallcebre según el talud infinito

El análisis de susceptibilidad a la rotura mediante el cálculo del factor de seguridad celda a celda en base al talud infinito presentado en el capítulo 4 de esta memoria, nos permite definir las siguientes conclusiones. Éstas están basadas, lógicamente, en la aplicación al deslizamiento de Vallcebre.

- 1) Aunque el análisis del talud infinito para un gran deslizamiento en un SIG es viable, los factores de seguridad resultantes de cada celda y los mapas representando estos factores no se pueden interpretar de forma individual pudiendo llevar a conclusiones sin sentido o erróneas. Para hacerse una idea del resultado del análisis es más indicado calcular las fuerzas resultantes de todo el deslizamiento o de alguna sección longitudinal de éste.
- 2) Los procedimientos de interpolación del SIG utilizado son muy sensibles a la distribución espacial de los puntos conocidos utilizados. Por otra parte, la interpolación de una superficie geológica como puede ser la de rotura, no es una tarea fácil teniendo en cuenta que la mayor parte de las funciones de interpolación existentes en el SIG utilizado, permiten interpolar superficies del relieve o piezométricas. En Vallcebre ha sido necesario utilizar información adicional a la de la instrumentación del deslizamiento, para adecuar las superficies necesarias para el análisis, a la geometría interpretada del deslizamiento.
- 3) Los resultados del análisis al deslizamiento de Vallcebre contrastados con los datos de su auscultación permiten validar el análisis de estabilidad realizado y son coherentes con lo que se observa del deslizamiento. Esto nos permite concluir la validez de este tipo de análisis determinístico para grandes deslizamientos aplicado a un SIG.
- 4) La experiencia reunida en el análisis en Vallcebre nos permite concluir que los análisis de susceptibilidad a la rotura mediante métodos determinísticos (por lo general, el del talud infinito), aplicados a escala regional con SIG, sólo tienen utilidad e interpretación si los deslizamientos esperados en el área son del tamaño de una sola celda de la malla regular utilizada. O bien cuando se identifica la extensión de los deslizamientos y se analizan cada uno de ellos globalmente. En caso contrario, los resultados y el mapa obtenido son difíciles de interpretar y pueden conducir a error.

Perspectivas de futuro

Los nuevos avances en tecnología, tanto en tecnología SIG, como en informática, y en teledetección, entre otros, permiten pensar en líneas futuras de investigación relacionadas con los aspectos tratados en esta memoria.

Quizá uno de los aspectos más interesantes para la investigación es el avance en la obtención de MDE precisos y a distintas resoluciones con un coste asequible para los centros de investigación. Ello permitirá tener información de muchas áreas y la posibilidad de analizar una mayor parte del territorio.

En cuanto a futuras líneas de estudio cabe pensar, por un lado, en la captura automática de las variables no derivadas del MDE, utilizadas en el análisis de susceptibilidad a los deslizamientos superficiales. Estas variables (densidad de vegetación-usos del suelo –VEGET-, presencia de formación superficial –FMS- y espesor de ésta –GROSOR-) han sido capturadas mediante interpretación de fotografía aérea, chequeo de campo y digitalización. De estas tres, la vegetación y la presencia de formación superficial pueden ser obtenidas mediante tratamiento de imágenes satélite, lo que reduciría ostensiblemente el tiempo empleado en su obtención. Así mismo, otros factores no considerados como la litología podrían también ser capturados mediante teledetección, permitiendo ser incluidos en el análisis. El factor espesor de la formación superficial, por el contrario, precisa de trabajo de campo, y no parece que exista otra alternativa a corto plazo, si se quiere incluir en el análisis, considerando que puede ser un factor importante para una zona determinada.

En esta misma línea el inventario de deslizamientos superficiales también puede realizarse mediante el tratamiento de imágenes reduciendo el tiempo de recogida de información. Este aspecto es importante dado que el análisis presentado aquí trabaja en formato raster y utiliza la zona de rotura de los deslizamientos, definida por una celda favoreciendo, por tanto, el proceso si se trabaja con imágenes digitales.

Por otra parte la mejora de los SIG, así como el avance en el análisis de MDE con nuevos algoritmos y funciones de análisis, pueden permitir en un futuro obtener, de forma automática, otros factores relacionados con la geometría de la ladera y la cuenca de drenaje, que contribuyan en la estabilidad de la ladera, como el perímetro de la cuenca acumulada o el ángulo de la pendiente de la ladera por encima de la zona de rotura (Baeza, 1994).

La delimitación y exclusión del análisis de las líneas divisorias de agua, así como de los fondos de valle de los ríos más importantes de un área de estudio, pueden mejorar los resultados del análisis de susceptibilidad a deslizamientos superficiales. Con esta exclusión es posible regionalizar el análisis aunque el mapa final de susceptibilidad debe presentar estas características. La delimitación de estas características del relieve es un procedimiento disponible con las herramientas actuales del SIG utilizado en esta memoria, aunque aquí no se han presentado los resultados.

En el campo de la peligrosidad (hazard) a deslizamientos la obtención de los algoritmos necesarios para calcular el alcance de deslizamientos, entre ellos los desprendimientos, en un SIG, puede permitir avanzar en la creación de mapas de peligrosidad por deslizamiento de un área. En este sentido, no sólo los análisis de visibilidad y las funciones del SIG que permiten crear cinturones paralelos a una línea o polígono (buffer), pueden ser útiles para calcular el alcance, si no que se precisan funciones de vecindad y comandos que calculen el ángulo de alcance para cada celda susceptible, y consiguientemente, resuelvan cual es la celda de alcance correspondiente. De esta forma, a partir de un primer mapa de susceptibilidad, seleccionando los niveles más susceptibles se podría calcular, en un paso posterior, las correspondientes celdas de alcance para crear un mapa de peligrosidad.

El problema del cálculo del alcance es similar al de obtener de forma automática el factor ángulo de la pendiente de la ladera por encima de la zona de rotura. En ambos casos hay que hacer un cálculo, el resultado del cual no se adjudica a la celda sometida a cálculo sino a otra celda distinta. En el caso de la pendiente encima de la zona de rotura, el resultado para cada celda debe adjudicarse a su celda vecina aguas abajo de la ladera. Y esto no puede

realizarse en la actualidad directamente con ninguna función disponible en el SIG utilizado (como hemos comprobado) ni con la combinación de funciones mediante un algoritmo.

En el campo de la susceptibilidad, y dado que en esta memoria se han presentado dos metodologías aplicadas a distintos tipos de deslizamientos (superficiales y un gran deslizamiento traslacional), otra línea de investigación es la del análisis de otros tipos de deslizamientos, más profundos aplicando un SIG. En este sentido, la clave está en estudiar e identificar, en un primer paso, los posibles factores relacionados con los deslizamientos, y una vez definidos éstos, intentar capturarlos de forma automática. Considerando este aspecto una línea de trabajo puede ser, en el caso de deslizamientos más profundos y de mayores dimensiones que los superficiales, el reconstruir, en un primer paso, la topografía previa a la rotura. La metodología presentada por Thurston y Degg (2000) para reconstruir la topografía mediante el uso de una red de triángulos irregulares (Tin) ha sido comprobada por nosotros utilizando una malla regular y con deslizamientos de tipo coladas de tierras (earthflow) en el área de Vallcebre, aunque los resultados no se presentan aquí. Ello evita el trabajar con una topografía posterior a la de rotura para el análisis de susceptibilidad.

Otra línea de trabajo es la identificación automática de deslizamientos a partir de MDE o de redes de triángulos irregulares mediante las características del relieve, y por tanto, la combinación de parámetros relacionados con la geometría de la ladera y con la red de drenaje. Dependiendo de la resolución (aunque también de la precisión) del MDE utilizado y de las dimensiones de los deslizamientos existirán morfologías más fáciles de identificar en una malla regular como elevadas pendientes de la cicatriz de rotura o perfiles cóncavos de la zona de depósito.

Con todo lo visto hasta aquí y considerando un área con distintos tipos de deslizamientos (y en su caso, de otros riesgos) se puede llegar a realizar un mapa multicriterio y multiriesgo con un SIG.

Finalmente cabe mencionar el avance en sistemas expertos y redes neuronales aplicados al análisis de estabilidad de laderas y a la estimación de susceptibilidad a deslizamientos. Cualquier avance en este campo es de enorme interés, aunque a nuestro entender, es preferible avanzar en la mejora y creación de nuevas herramientas en un SIG que permitan realizar lo expuesto hasta aquí y dejar las decisiones expertas para el usuario.