

CAPÍTULO 5

EVALUACIÓN DEL ERROR

5.1 INTRODUCCIÓN

En el Capítulo 1 se comentaron los errores posibles en un proyecto de aplicación de SIG (ver apartado 1.4.9). La importancia del error y de su evaluación en la valoración de la calidad final de los resultados del análisis de susceptibilidad de los métodos presentados aquí y de cualquier otro modelo, debe ser tenida en cuenta. Por ello en el presente capítulo de la memoria se comentan los errores encontrados a lo largo de la realización del trabajo, aunque no se realizará una estimación cuantitativa del error.

En este capítulo se tratan los errores en tres grandes grupos:

- Errores asociados a datos de partida
- Errores asociados a datos derivados utilizados
- Errores asociados al método

Los primeros errores están asociados a los datos de partida utilizados, esto es los datos que se han recogido y digitalizado para llevar a cabo este trabajo, o datos utilizados existentes como el MDE u otros datos. Los errores asociados a datos derivados hacen referencia a los errores en los modelos del terreno derivados del MDE (variables derivadas del MDE) y a los errores inherentes a la conversión a formato raster de información vectorial (por ejemplo, variables categóricas primarias rasterizadas). Finalmente, los errores asociados al método se refieren a errores debidos a limitaciones del mismo.

Dado que se han trabajado 3 áreas distintas, los errores se comentaran, en caso que sea necesario, para cada área.

5.2 ERRORES ASOCIADOS A DATOS DE PARTIDA

Dos grandes grupos de datos de partida se utilizan en la presente memoria: datos preexistentes y datos originales recogidos para la Tesis. Los grupos y los datos pertenecientes a cada uno son los que siguen:

- 1) Datos preexistentes
 - Modelo Digital de Elevaciones (en las 3 áreas estudiadas)
 - Datos de sondeo y auscultación del deslizamiento de Vallcebre
- 2) Datos originales
 - Inventario de deslizamientos superficiales (la Pobla y Vallcebre)
 - Variables categóricas: VEGET, FMS y GROSOR

En este apartado se comentan cada uno de estos grupos y los casos utilizados. A pesar que para la estimación de la susceptibilidad de los deslizamientos superficiales se han utilizado 3 áreas piloto, no se comentarán los datos referidos al área del Bajo Deba por no ser recogidos por la autora de la memoria. Para los datos del Bajo Deba (MDE y variables categóricas véase en el Anejo 1 los metadatos de la información utilizada).

5.2.1 Datos preexistentes

Los datos preexistentes son aquellos datos utilizados y no recogidos de forma expresa para el proyecto, lo que puede conllevar un desconocimiento de la calidad y veracidad de los mismos. Por ello es interesante el disponer de datos de los datos usados, esto es lo que se conoce como metadatos. Los metadatos permiten, en el caso que dispongan de la suficiente información y que ésta sea fiable, conocer cualitativamente la calidad de la información que estamos utilizando, su forma de obtención, la fecha, actualizaciones, etc., entre otras informaciones. Por tanto son útiles para dar una idea de la fiabilidad de la información utilizada. Pero no siempre se dispone de metadatos.

A parte de los metadatos, se puede estimar la calidad de los datos utilizados por comprobación directa, contrastando con la realidad de la cual derivan.

Dos grupos de datos preexistentes, que se pueden ampliar a tres, son los utilizados en la presente memoria. A saber:

- El modelo digital de elevaciones (MDE de la Población de Lilet y de Vallcebre)
- Datos de sondeo, datos de instrumentación y datos de campo del deslizamiento de Vallcebre
- Fotografías aéreas, ortofotos y datos de campo para recoger información sobre las variables categóricas y el inventario de deslizamientos

Seguidamente se comentan aspectos relacionados con errores detectados o intuidos en cada grupo.

El modelo digital de elevaciones (MDE)

El MDE es una pieza clave en todos los métodos utilizados, aún más teniendo en cuenta que todos los procedimientos trabajan en formato raster. Es evidente que cualquier error que contenga el MDE se transmitirá a los datos que deriven de él y, por tanto, a los resultados finales. Dos aspectos importantes relativos al MDE pueden actuar como fuentes de error: la precisión y la resolución del MDE.

La precisión (accuracy) refleja el grado de ajuste del modelo a la realidad que intenta simular. Cuanto más preciso sea un MDE, con mayor acierto reflejará el relieve existente del área. Y a la inversa, cuanto menos preciso sea un MDE más se alejará de la realidad, perdiéndose detalles que diferencian unos paisajes de otros. Normalmente la precisión de los MDE se refleja en detalles del paisaje y no en los grandes rasgos (como líneas divisorias, valles fluviales, etc) que de por sí, siempre aparecen en los modelos, sea cual sea su calidad o precisión.

La resolución o tamaño de la celda de la malla regular del MDE, permite modelizar mejor los detalles del relieve cuanto más pequeño es el tamaño de la celda. El suavizado del relieve inherente al aumentar el tamaño de la celda de un área permite obviar pequeños

errores que puedan existir en el modelo, perdiendo a su vez, información que puede ser valiosa. El trabajar en formato raster facilita los cálculos y los análisis como los presentados en esta memoria, pero también, facilita la simplificación del relieve dividiéndolo en áreas cuadradas homogéneas, que según el tamaño de la celda, nos acercarán o alejarán de la realidad que se está modelando.

En los siguiente párrafos se comentan los aspectos de precisión y resolución del MDE y los errores encontrados en la Poble de Lillet y en Vallcebre.

Precisión del MDE

La precisión se puede estimar comparando directamente el modelo con el relieve en el campo y con fotografías aéreas de buena calidad, teniendo en cuenta, en todo caso, el tamaño de la celda. En este sentido, a menudo es más fácil detectar errores en zonas de topografía accidentada que en zonas más llanas con pendientes más suaves. Por ello no es fácil detectar todos los errores que pueden haber en un MDE.

El MDE de la Poble de Lillet parece tener una precisión correcta, dentro del tamaño de celda utilizado, y no se han detectado errores, aunque esto no quiera decir que no los haya. Situación muy distinta encontramos en el MDE de Vallcebre en donde se han detectado dos tipos de error. El primero es relativo a la retícula que se observa en el mismo (ver figura 5.1) cuando se visualizan modelos del terreno derivados del mismo. Este error es debido al montaje del modelo a partir de modelos correspondientes a las hojas 1:5.000 topográficas de la zona. El modelo fue restituido del mismo vuelo por distintas empresas trabajando con distinta calidad, ensamblaje que ha quedado plasmado en la retícula que junta las diferentes hojas topográficas en la zona. Por tanto, las celdas que caen en la mayor parte de la retícula contienen valores erróneos de altitud que se transmite a los posteriores modelos derivados (variables).

El otro tipo de error encontrado deriva directamente de la restitución del modelo y su calidad. Como se puede observar en las foto 5.1 y 5.2 y en la figura 5.2 (mapa topogràfic d'aquesta zona) el relieve existente, con el cantil rocoso, no queda adecuadamente reflejado en el mapa topográfico 1:5000 de la zona ni en el MDE que deriva de él. En la figura 5.3 se muestran las distintas zonas del área donde se han encontrado incongruencias entre el relieve y el mapa topográfico. Este error afecta claramente al análisis de susceptibilidad de roturas por deslizamientos superficiales realizado en el área. Una buena parte de los deslizamientos inventariados se localizan debajo del cantil rocoso formado por la barra de calizas de Vallcebre, término con que nos referimos al cantil. Como en algunas zonas el cantil no queda bien modelado, la pendiente obtenida derivada del MDE presenta error, dando valores superiores a 45 ° de pendiente en una buena parte de las celdas con roturas. Algunas de estas laderas con roturas, como se ha comprobado en el campo, tienen a lo sumo 35° de pendiente. Por tanto este tipo de error en Vallcebre afecta de forma importante al análisis de estabilidad y no tiene solución, como tampoco la tiene la retícula que se observa en algunas variables derivadas del MDE del área.

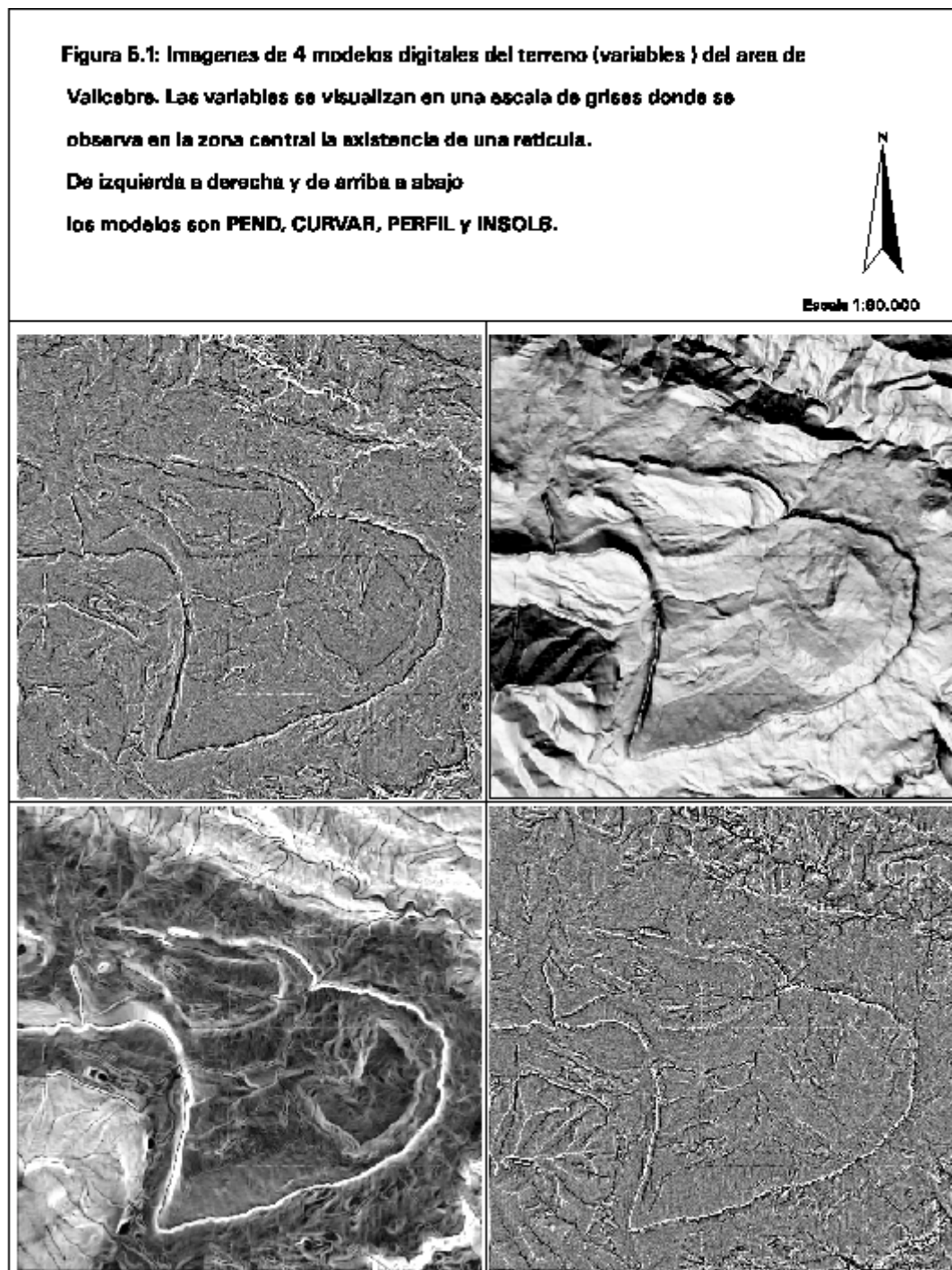




Foto 5.1: Inflexión de la barra caliza de Vallcebre en la zona SW del área de Vallcebre. El mapa topográfico no refleja bien el cantil rocoso ni su pequeña inflexión a la derecha de la fotografía.



Foto 5.2: El mismo cantil de Vallcebre un poco más hacia el Este. Se observa un escalón en el cantil mostrado por la línea de árboles, que no queda reflejado en el mapa topográfico.

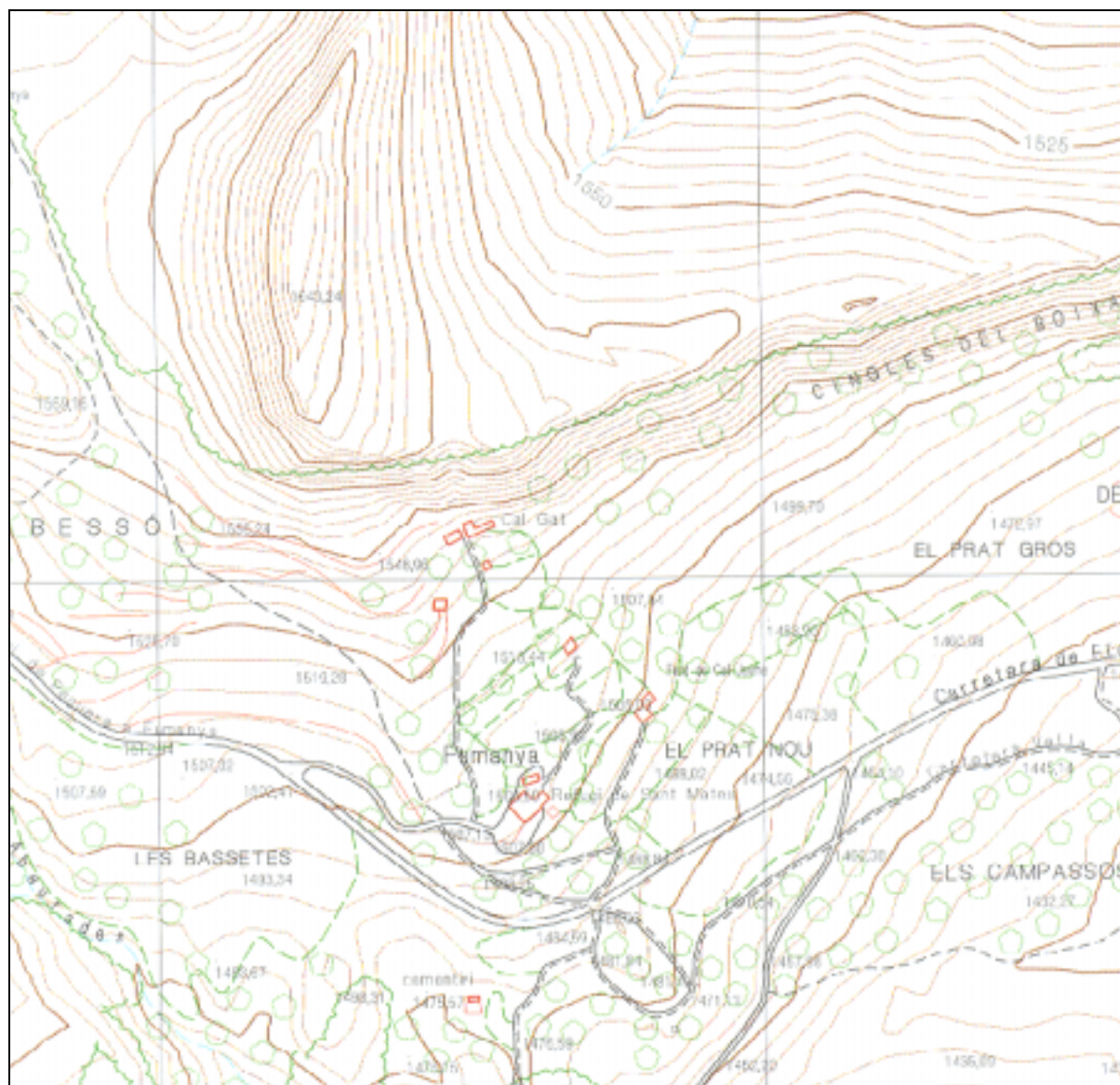


Figura 5.2: Mapa topográfico 1:5.000 del límite suroeste de la barra calcárea de Vallcebre (véase Cingles del Boixader en la figura). Compárese las curvas de nivel de esta zona o al norte de la casa citada como Cal Gat y el relieve de la Foto 5.1.

Resolución del modelo

El tamaño de celda de la malla regular utilizada (15 y en el capítulo 3 también la malla de 45) ha influido no sólo en el suavizado del relieve modelado sino también en la comisión de errores. Un ejemplo de ello lo encontramos en la Pobla de Lillet. Comprobando algunas celdas del nivel de susceptibilidad más elevado según el análisis discriminante realizado, se ha detectado la existencia de celdas con valores muy altos de la variable LONG (longitud de cuenca ponderada con la pendiente) y con valores relativamente altos de PEND (18° a 22°). Los valores altos de LONG en esta área corresponden al fondo de valle perteneciente al río Llobregat y al Arija, afluente del primero. Por su parte las pendientes no pueden corresponder a estos fondos de valle puesto que en ningún punto del área estos dos ríos llegan a alcanzar estas pendientes en sus cauces. Este error es debido a la resolución del MDE (celdas de 225 m^2) que atribuye al cauce la pendiente de las laderas vecinas, en

aquellas zonas donde el curso fluvial está más encajado. Como este error, deben existir más aunque no se han investigado.

En Vallcebre los errores detectados debidos a la resolución del MDE están relacionados con los cantiles rocosos, los cuales si fueron restituidos en el mapa topográfico, pero en el modelo no se aprecian casi, debido a la resolución del mismo y a la pequeña entidad de estos cantiles (de 10 a 25 m de caída).

Datos del deslizamiento de Vallcebre

Además del MDE del que ya se ha comentado, y que en el caso de la zona del deslizamiento se observa una de las líneas de la retícula, los datos existentes utilizados para el análisis del deslizamiento de Vallcebre son los de la instrumentación, los sondeos, medidas en GPS, ensayos de laboratorio y datos de campo no recogidos por la autora. No se han detectado errores en los datos de instrumentación utilizados (que son muy pocos en comparación con la información de que se dispone). No se tiene en cuenta el propio error de medida de cada equipo, dado que la escala de trabajo del análisis es mucho más amplia. En general no se han detectado errores en ningún dato utilizado, excepto el MDE.

Fotografías aéreas, ortofotos y datos de campo

El único error detectado relacionado con estos datos es la existencia de 1 mm, en ocasiones 1.5 mm de variación (decalaje), entre la retícula UTM del poliéster donde se delimitaban los polígonos a digitalizar y la retícula UTM de las ortofotos correspondientes y que se situaban debajo, para poder delimitar los polígonos. Este error es muy pequeño y afecta poco al análisis.

5.2.2 Datos originales

La información para disponer de las variables categóricas así como del inventario de deslizamientos proviene de la interpretación de fotos aéreas, chequeo de campo y limitación de los polígonos sobre ortofotos a escala 1:5.000. Aquí el error no radica en la información en sí, sino en la subjetividad de la interpretación y recogida de los mismos. Se trata más bien de la incertidumbre asociada a los datos. Para mostrar esto se comenta algún ejemplo de los inventarios de deslizamientos y de las variables categóricas utilizadas.

Estos datos fueron digitalizados, constituyendo la digitalización una posible fuente de error. En nuestro caso se comprobaron los resultados de la digitalización de algunas zonas de Vallcebre y de la Pobla contrastando estas salidas gráficas con los poliésteros que se digitalizaron. De esta contrastación se ha estimado que el error del proceso de digitalización es muy bajo y la digitalización resultante es buena.

Inventario de deslizamientos

El primer ejemplo se muestra en la figura 5.4 y se basa en el inventario de deslizamientos. Como se observa en la figura se trata de dos inventarios de deslizamientos superficiales realizados en la misma zona, con los deslizamientos del mismo evento lluvioso. La subjetividad intrínseca de cualquier mapa geomorfológico se ve reflejada en esta figura. La pregunta es ¿cual de los inventarios es el correcto? o bien, ¿existe un inventario mejor que otro?. La respuesta objetiva no se conoce, tan sólo se puede expresar aquí que el

inventario utilizado en la memoria es el que se cree más acertado, aunque no por ello exento de incertidumbre.

La incertidumbre en el caso de los deslizamientos inventariados se hace más patente al pensar en el método utilizado que consiste en situar un punto centroide en la zona de rotura. Dependiendo del tamaño del deslizamiento el punto se ha situado más arriba, cercano a la cicatriz, o más por debajo. En deslizamientos de dimensiones muy reducidas el punto se ha situado como si fuera el punto de gravedad del movimiento. Esto puede conducir a error en algunos casos, situando el punto fuera de la zona de rotura, y por tanto analizando laderas no rotas. La incertidumbre de este efecto se considera, no obstante, baja.

Variables categóricas (VEGET, FMS y GROSOR)

Es en las variables categóricas donde la probabilidad de error es mayor. En la tabla 5.1 se muestra la estimación cualitativa de la incertidumbre asociada a estas variables y al inventario de deslizamientos de las dos zonas piloto del prepirineo catalán.

DATOS	INCERTIDUMBRE
LA POBLA DE LILLET	
Inventario deslizamientos	Baja
Vegetación	Media
Existencia formación superficial	Media
Espesor formación superficial	Alta
VALLCEBRE	
Inventario deslizamientos	Baja
Vegetación	Media/alta
Existencia formación superficial	Media

Tabla 5.1: Estimación cualitativa de la incertidumbre asociada a los datos originales utilizados en la presente memoria.

Un ejemplo de la incertidumbre asociada a estas variables es el mapa del espesor de la formación superficial (variable GROSOR). Como en otros mapas geológicos, la interpretación y la extrapolación son elementos utilizados y no exentos de subjetividad. En el caso concreto del espesor, que sólo se puede medir directamente en taludes de carreteras y pistas forestales, la extrapolación ha jugado un papel importante. La incertidumbre en este mapa es, por lo tanto, alta.

Otra fuente de error puede ser la definición de algún polígono como bosque bajo (matorral) cuando se podría considerar bosque claro en el mapa de vegetación (variable VEGET). Esto es debido a que no siempre ha sido posible contrastar directamente en el campo todo el territorio estudiado debido a dificultad de acceso o tiempo limitado.

Figura 5.3: Localización de las zonas de la barra caliza de Valcebres y por debajo de esta donde se han encontrado errores del mapa topográfico respecto el relieve de la zona.

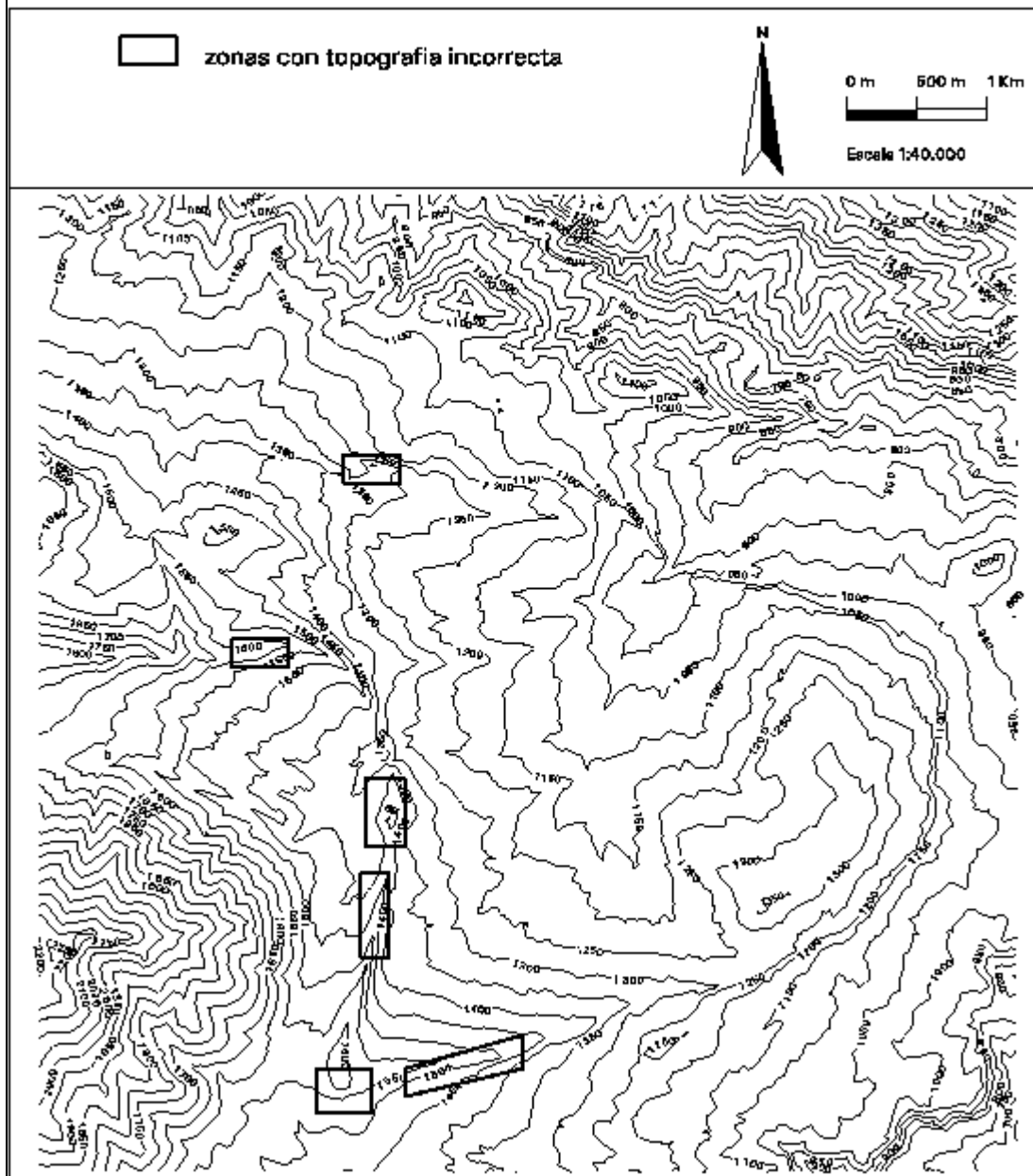
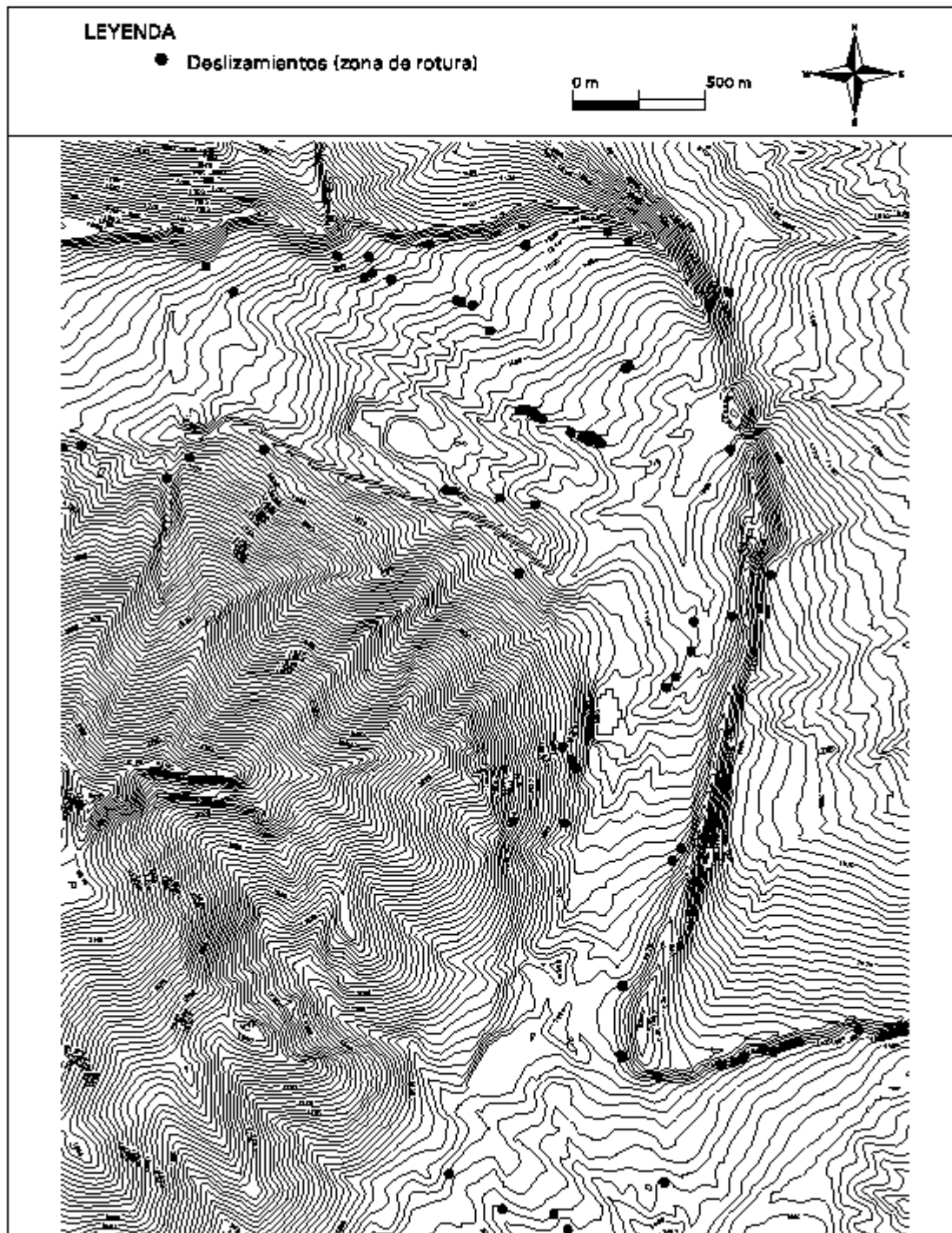


Figura 5.4 b: Inventario de deslizamientos superficiales utilizado en la presente memoria para la misma zona de estudio (zona SW de Vallcebre).



5.3 ERRORES ASOCIADOS A DATOS DERIVADOS UTILIZADOS

Los datos utilizados en los análisis y derivados, o bien de datos preexistentes, o bien de datos originales, heredan los errores habidos en esta información, y en algunos casos, amplifican el error. Estos datos derivados se dividen en dos grupos:

- Variables derivadas del MDE
- Variables categóricas transformadas a formato raster

En los siguientes párrafos se comentan los aspectos relativos al error de estos datos.

Variables derivadas del MDE

Las variables derivadas del MDE arrastran los errores de éste y en algún caso pueden ampliar el error. La forma en que se obtienen algunas variables como la pendiente de la ladera, mediante una ventana de análisis de 3 * 3 celdas, implica que los valores finales en cada celda sean un promedio de esta ventana, alejándose más de las características del relieve que intentan reflejar.

El modelo digital de pendientes es una de las variables donde este efecto puede influir más en los resultados finales, teniendo en cuenta que es el factor más importante relacionado con la estabilidad. Un ejemplo del error relacionado con la pendiente se ha tratado en el apartado del MDE en la zona de Vallcebre (ver apartado 5.2.1). Otro ejemplo en el modelo de pendientes es la acotación de los valores de la pendiente en rangos medios debido al efecto promedio de la creación del modelo. Así, en el área de la Población de Lillet y según el modelo de pendientes, el rango oscila entre 0 y 65° de pendiente máxima, cuando en realidad en el campo se pueden observar hasta pendientes de 90°. De la misma manera en Vallcebre el rango de pendientes oscila entre 0 y 69°, suavizando totalmente los 90° de los cantiles rocosos existentes en el área.

Algunas variables como la longitud de la cuenca, la pendiente media de la cuenca y la rugosidad precisan del modelo de pendientes para su creación, lo que permite heredar el error no sólo del MDE sino también del modelo de pendientes. Hay que tener en cuenta que una parte del error viene condicionado por la resolución del MDE con el que se está trabajando.

Otro error o limitación es la utilización del modelo de insolación (variable INSOL) producto de la media de 15 modelos. Esta media produce un modelo final con un rango de valores muy limitados a los valores centrales, lo que quizás es la causa de su nula correlación con la variable orientación cuya función es muy parecida.

Finalmente cabe comentar que algunas de las variables derivadas utilizadas presentan valores anómalos o bajos en las celdas que bordean todo el modelo. Ello es debido a que estos modelos digitales se derivan a partir de algoritmos que utilizan una ventana de análisis para los cálculos dando el valor resultante a la celda central. Por tanto las dos primeras celdas que bordean todo el área presentarán valores erróneos. Esto ocurre básicamente en el modelo de pendientes de la ladera (variable PEND) y en el resto de modelos que utilizan la pendiente (LONG, LFS, PENDM y RUGOS). Por su parte la variable INSOL utilizada, que es la media de 15 modelos de insolación, presenta celdas sin valor a lo largo del borde del área debido al algoritmo de obtención de estos modelos.

Variables categóricas transformadas a formato raster

Las ventajas inherentes a trabajar en formato raster (malla regular) en cuanto a rapidez y facilidad de cálculo, se reducen al aumentar el tamaño de la celda utilizada y al alejarse del fenómeno analizado. Las variables categóricas digitalizadas en formato vectorial se han transformado a formato raster para el análisis, lo que ha conllevado algunos errores.

En el caso del inventario de deslizamientos superficiales, el punto centroide utilizado para el análisis no tiene porque ser fuente de error al convertirse en una celda, aunque depende de donde esté situado el punto, le tocará a una celda que pueda presentar mucha menor área de rotura que su celda vecina. El error o la simplificación, en el caso de los deslizamientos, es debida a la existencia de deslizamientos pequeños y muy próximos que se convertirán en una sola celda según la resolución de la malla utilizada. Como ejemplo de ello en el área de la Población de Lillet se inventariaron 288 deslizamientos que se han convertido en 272 celdas con roturas en la malla de 15 * 15 m y en el área de Vallcebre se ha pasado de 316 deslizamientos inventariados a 308 celdas con roturas. Otro tanto ha ocurrido al aumentar el tamaño de la celda para el análisis con la malla de 45 * 45m.

Para el resto de variables categóricas (VEGET, FMS y GROSOR en la Población de Lillet) constituidas por polígonos en formato vectorial, el proceso de conversión a formato raster ha conllevado errores de difícil solución. La conversión se realiza de manera que la celda final contiene el valor del polígono con la mayor superficie dentro de la celda (ESRI, 1997). Esto se puede controlar utilizando una tabla de ponderación para facilitar que características con poca área pero muy importantes o que se quieren resaltar, sean las que definan con su valor la celda resultante de la rasterización. Pero este proceso es automático y se aplica para todo el área, lo que no siempre es adecuado para el procedimiento presentado aquí. En nuestro caso no se ha utilizado ninguna tabla de ponderación en el proceso de rasterizado.

Errores detectados debidos a este proceso y, a la vez, a la resolución de la malla regular son:

- Celdas con valores de pendiente alta (mayor de 45°) y con presencia de formación superficial
- Celdas con valores de pendiente alta (mayor de 45°) y con espesor de depósitos superficiales (y por tanto con presencia de formación superficial)
- Celdas de niveles susceptibles con pendientes aceptables (25-40°) y con substrato rocoso

Ha sido más fácil detectar los errores asociados con las variables FMS y GROSOR que con la variable VEGET, dado que la vegetación no mantiene una relación clara con la pendiente de la ladera, como si lo hace la formación superficial. Por ello creemos que existen más errores de los detectados por el efecto de rasterización de las variables vectoriales, en relación con el mapa de vegetación.

5.4 ERRORES ASOCIADOS AL MÉTODO

Además de los errores asociados a los datos y a la obtención de éstos, encontramos los errores asociados al método utilizado. En la presente memoria se ha trabajado en formato raster, algunas limitaciones del cual ya se han comentado previamente, y se han utilizado tres métodos de estimación de la susceptibilidad a la rotura. En este apartado se comentan los errores detectados asociados a estos métodos dentro del SIG. Los métodos utilizados son:

- Análisis estadístico multivariante de tipo discriminante
- Cálculo del Factor de Seguridad celda a celda mediante el Talud infinito

Susceptibilidad a la rotura mediante el análisis discriminante

Los ajustes realizados en algunas variables como las relacionadas con la cuenca para evitar, en pasos posteriores, perder el valor de algunas celdas (valor NODATA en terminología ARC/INFO), se podrían considerar pseudoerrores dado que se está alterando el valor de las celdas. A pesar de ello, estas transformaciones representan una modificación mínima respecto al valor real de la celda, y se dan por válidas.

De entre las limitaciones del método conducentes a error, comentadas a lo largo del capítulo 3 y que no serán discutidas aquí, cabe destacar las dos siguientes fuentes de error tratadas en los siguientes párrafos:

- La definición de las celdas sin roturas y la obtención de la muestra de las mismas
- La combinación de las variables de forma lineal en la función

Definición de las celdas sin roturas y obtención de la muestra

Como ya se ha comentado en el capítulo 3 la definición de celdas sin roturas, aparentemente estables, al resto de celdas de la zona estudiada, es un error que se arrastra en todo el análisis posterior. De esta manera, celdas sin roturas, consideradas como población estable, y susceptibles a ser seleccionadas para la muestra en el análisis estadístico, pueden en realidad, algunas de ellas, ser celdas susceptibles a rotura, pero que no han tenido todavía la ocasión de romperse. Esto puede inclinar los resultados del análisis sobre la estabilidad (T-test, One-Way y función discriminante) de forma que las dos poblaciones no tengan características muy distintas y exista un amplio rango de mezcla. Por tanto, el no definir previamente la muestra *totalmente estable y sin roturas*, como se hace con las celdas con roturas, es un error que limita las posibilidades del análisis discriminante.

Combinación lineal de las variables

La función discriminante supone la combinación lineal de las variables incluidas en la función. Ello puede conducir a errores, como se ha introducido en el capítulo 3, cuando alguna variable de la función tiene valores extremos que permiten que las celdas con estos valores sean asignadas a niveles de susceptibilidad que no les corresponden. Este error, no obstante, debe atribuirse más a la resolución y precisión del MDE utilizado que al método estadístico y al procedimiento de definición de los niveles de susceptibilidad. Y debe ser así, si se tiene en cuenta que los valores de las distintas variables utilizadas en el procedimiento, para una misma celda deben ser coherentes. Dicho de otro modo, y por poner un ejemplo, como ocurre en el campo, una celda con una área de cuenca o una longitud de cuenca muy

grandes deberá tener una pendiente mínima, puesto que se tratará del fondo de valle de un río. Cualquier incongruencia en este sentido se deberá a un error derivado, en la mayor parte de los casos de la limitación del MDE utilizado.

Otra fuente de error es el comportamiento de cada variable de forma individual con la estabilidad de la ladera. No todas las variables tienen un comportamiento lineal con la estabilidad, y este comportamiento dependerá según el área de estudio. La variable PENDS se ha utilizado para reflejar este comportamiento, y quizás, variables como las relativas al área cuenca también precisen de transformaciones similares para reflejar que fondos de valle, de ciertas dimensiones, y divisorias de agua no son susceptibles a roturas.

Otro error o limitación a tener en cuenta es que algunas de las variables no seleccionadas para el análisis discriminante, debido a sus altas correlaciones con otras variables, podrían haber dado mejor acierto en la clasificación de la función que el obtenido con sus variables correlacionadas. Esto es así dado que la selección de las variables para el análisis se ha hecho teniendo en cuenta su relación con la estabilidad y las correlaciones existentes. Pero en el análisis discriminante se utiliza la combinación de variables que mejor explica la diferencia entre dos poblaciones, que es distinto de relacionar de forma individual cada variable con la estabilidad.

Cálculo del Factor de Seguridad celda a celda

El método utilizado en esta memoria para el cálculo del Factor de Seguridad celda a celda se basa en 4 procesos. A saber:

- Interpolación de superficies a partir de datos puntuales
- Ajuste de estas superficies
- Derivación de parámetros a partir de estas superficies
- Cálculo del factor de seguridad

Algunos de estos pasos conllevan más posibilidad de producir errores que otros, con independencia de los errores que puedan existir en los datos de partida comentados con anterioridad. En los siguientes párrafos se comentan los errores detectados en el proceso.

Interpolación de superficies a partir de datos puntuales

Este es el proceso de todo el análisis que comporta más incertidumbre y más fuente de error. El hecho de tener que interpolar 3 superficies a partir de pocos puntos (sondeos) ha obligado a utilizar puntos adicionales cuyos valores y localización son estimados a partir del conocimiento de campo. Por tanto aquí ya tenemos una primera fuente de incertidumbre y de error, aunque estimamos que la incertidumbre es entre baja y media.

Otro aspecto a tener en cuenta son las funciones de interpolación existentes en el SIG utilizado. La mayoría de las funciones sirven para interpolar superficies determinadas, que normalmente son piezométricas o del relieve. En este sentido una superficie como la de rotura, que es una superficie geológica, plantea más problemas para ser interpolada. Por ello se precisan más puntos adicionales para su interpolación con el consiguiente aumento de la incertidumbre.

También cabe tener en cuenta que los datos utilizados en la interpolación se combinan con el MDE para obtener un valor de elevación, con el cual interpolar las

superficies. Si el MDE presenta imprecisión, ésta se transmitirá en aquellas celdas donde se utilicen puntos para interpolar. En nuestro caso la retícula existente en el MDE de la zona de Vallcebre no se localiza en la unidad inferior del deslizamiento de Vallcebre, aunque si en la unidad media no estudiada. Si existe algún error de imprecisión en el MDE no se ha detectado puesto que se trata de una zona de relieve suave.

Finalmente, el problema de trabajar con formato raster conlleva que no se utilice todo el área deslizada, dado que se precisa acotar las celdas dentro de ésta, dejando pequeñas áreas a lo largo del contorno del deslizamiento sin analizar. De la misma forma los límites laterales de la superficie de rotura no pueden ser bien interpolados cuando se trabaja en formato raster y con el tamaño de celda que se utiliza aquí. Por tanto, este aspecto es otra fuente de error que afecta a la mayor parte de las celdas que bordean la unidad inferior estudiada .

Ajuste de las superficies

Las superficies interpoladas son ajustadas con el MDE y entre ellas, para que no existan incongruencias o errores como el nivel piezométrico por debajo de la superficie de rotura, o ésta situándose por encima del relieve topográfico. Estos errores son debidos al proceso de interpolación y deben tenerse en cuenta antes de continuar el análisis. Los ajustes se realizan automáticamente a todo el área lo que conlleva un error puesto que no todas las celdas a ajustar deben ser ajustadas con el mismo valor. A pesar de ello, son pocas las celdas a ajustar y se estima que el error es bajo.

Derivación de los parámetros a partir de estas superficies

Los parámetros o variables derivadas arrastran el error de los modelos (superficies interpoladas) de los que derivan. En el caso de la pendiente de la superficie de rotura se producen nuevos errores debidos al algoritmo utilizado que suaviza la pendiente de las celdas situadas en el contorno del deslizamiento. Esto es debido a que el algoritmo trabaja con una ventana de 3×3 celdas calculando la pendiente para la celda central. Por ello estas celdas tienen pendientes más suaves de las que les correspondería.

Cálculo del factor de seguridad

El cálculo del factor de seguridad no entraña ningún error, en todo caso arrastra los errores de los parámetros que utiliza para el cálculo.

Donde si se comete error es en el cálculo de las fuerzas resultantes de las 4 secciones longitudinales delineadas sobre el deslizamiento. Estas secciones, que son líneas delineadas en formato vectorial, son convertidas a formato raster, y puesto que no siguen los dos ejes de la malla regular, presentan dos celdas contiguas en algunos puntos de cada sección longitudinal. Esta “duplicación” conduce a aumentar, en cierta manera, el valor de las fuerzas resultantes que se calculan como sumatorio a lo largo de una sección dada.

5.5 CONCLUSIONES

Vistos los distintos procedimientos de análisis de susceptibilidad utilizados en la presente memoria aplicando SIG, se comentan para cada procedimiento las siguientes conclusiones en relación con la estimación o detección del error.

Para el análisis de susceptibilidad a la rotura de la ladera de deslizamientos superficiales mediante análisis estadístico discriminante se puede concluir lo siguiente:

- 1) El MDE y su precisión (aunque también su resolución) es la primera fuente de error del proceso de análisis. Su precisión es de vital importancia dado que de él derivan el resto de modelos del terreno (variables derivadas) utilizados y puesto que el análisis se realiza en formato raster. De los MDE utilizados (la Pobla de Lillet, el Bajo Deba y Vallcebre) el de Vallcebre es el modelo donde se han detectado más errores y mayor imprecisión.
- 2) Los datos originales utilizados en el análisis (inventario de deslizamientos y variables primarias) presentan un grado variable de incertidumbre. El inventario de deslizamientos superficiales conlleva incertidumbre baja aumentando esta con la información sobre vegetación, existencia de formación superficial y, en especial, con el espesor de ésta.
- 3) El trabajar en formato raster facilita el tipo de análisis estadístico utilizado, la obtención de variables derivadas y la regionalización y repetición del análisis. Pero este formato produce errores asociados a la rasterización de la información vectorial, la acotación del rango de valores de las variables a valores medios y el utilizar unidades de análisis (celdas) sin relación con el medio físico estudiado.
- 4) El análisis de la susceptibilidad presenta dos importantes limitaciones que son fuentes de error en la inclusión de las celdas a los niveles de susceptibilidad finales delimitados: la definición de las celdas sin roturas y selección de la muestra y la combinación lineal de las variables de la función discriminante.

En el procedimiento del análisis de susceptibilidad a la rotura de un gran deslizamiento, mediante el cálculo del factor de seguridad celda a celda según el talud infinito, y en el caso concreto del deslizamiento de Vallcebre estudiado, se pueden definir las siguientes conclusiones en relación a los errores.

- 1) La precisión del MDE utilizado afectará a los resultados finales, sobretodo en aquellas celdas donde se dispone de información para el proceso de interpolación o en las celdas donde se utilicen puntos de apoyo a esta información.
- 2) El proceso de creación de las superficies de rotura y piezométricas (interpolación y ajuste) es la parte del análisis que comporta mayor error e incertidumbre, debido tanto al tener que utilizar puntos de apoyo adicionales, como al tener que ajustar las incongruencias de algunas celdas de las superficies interpoladas.
- 3) Los errores habidos en las superficies finales utilizadas se arrastran a los parámetros derivados de éstas (pendiente de la superficie de rotura, profundidad de ésta y espesor de la zona saturada).
- 4) Finalmente, el cálculo de fuerzas resultantes en secciones longitudinales del deslizamiento da una indicación de estas fuerzas con el error o limitación asociado, debido a la rasterización de las líneas que definen estas secciones.