

## CAPÍTULO 3

### ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE LAS LADERAS A PRODUCIR DESLIZAMIENTOS SUPERFICIALES

El presente capítulo desarrolla el procedimiento utilizado para analizar la susceptibilidad que muestran las laderas, para dar lugar a deslizamientos superficiales. El procedimiento se basa en la técnica multivariante del análisis discriminante. En este capítulo se presentan y se comparan los resultados de tres zonas de aplicación del método, así como el uso de celdas de distinto tamaño en una misma zona y su influencia en el resultado final.

Antes de proceder a la descripción de los pasos seguidos y sus resultados, definiremos qué entendemos por deslizamientos superficiales, la hipótesis de rotura y los factores condicionantes seleccionados. Finalmente, describiremos las características de las zonas piloto donde se ha aplicado el procedimiento.

#### 3.1 LOS DESLIZAMIENTOS SUPERFICIALES

##### 3.1.1. Introducción

El término deslizamiento se atribuye a aquellas roturas de las laderas que tienen lugar a lo largo de una o más superficies discretas y continuas mediante mecanismos de cizalla. La masa desplazada se asimila a un bloque rígido aunque puede llegar a fragmentarse. El movimiento puede ser lento a moderadamente rápido. Los deslizamientos superficiales son aquellos deslizamientos cuya superficie de rotura se sitúa a una profundidad media de 1 a 2 metros, afectando a la formación superficial que recubre la ladera (coluvión), e incluso la parte alterada del substrato cuando éste es de naturaleza lutítica. El volumen movilizado por los deslizamientos superficiales oscila, en general, entre algunas decenas y unos pocos miles de metros cúbicos.

Desde el punto de vista morfológico, se pueden distinguir dos partes en los deslizamientos superficiales: el área fuente y el área de deposición y en ocasiones puede identificarse una zona de transición (Hatano y Oyagi, 1977), pudiéndose denominar las dos primeras como zona de rotura y zona de progresión de la masa respectivamente (Baeza, 1994) (véase figura 3.1). En la zona de rotura o cicatriz se produce un déficit de masa debido al desplazamiento del material. En esta zona, la cabecera del deslizamiento adquiere un perfil cóncavo bordeado por un escarpe, en cuyo pie aparece la superficie de rotura. La zona de progresión comprende la trayectoria por donde discurre la masa movilizada y el área de acumulación de ésta. En algunos casos, la zona de transición no se diferencia de la zona de acumulación y el material de depósito suele encontrarse solapando parte de la zona de rotura.

Desde el punto de vista morfométrico los deslizamientos superficiales están caracterizados por relaciones entre el grosor máximo (D) y la longitud de la zona de rotura (L) inferiores a 0.1 ( $D/L < 0.1$ ) según Moser y Hohensinn. (1983).

El término deslizamiento superficial se utiliza de forma genérica y comprende diversos tipos de movimientos de ladera. Según la morfología del movimiento la zona de rotura identifica el tipo de mecanismo en los primeros estadios de rotura, mientras que la zona de progresión el mecanismo puede ser distinto al primero. En las zonas de estudio predominan los deslizamientos traslacionales (debris slides y earth block slides según Hutchinson, 1988) y corrientes de derrubios (debris flow según Varnes, 1978) (véase fotos 3.1, 3.2 y 3.3).

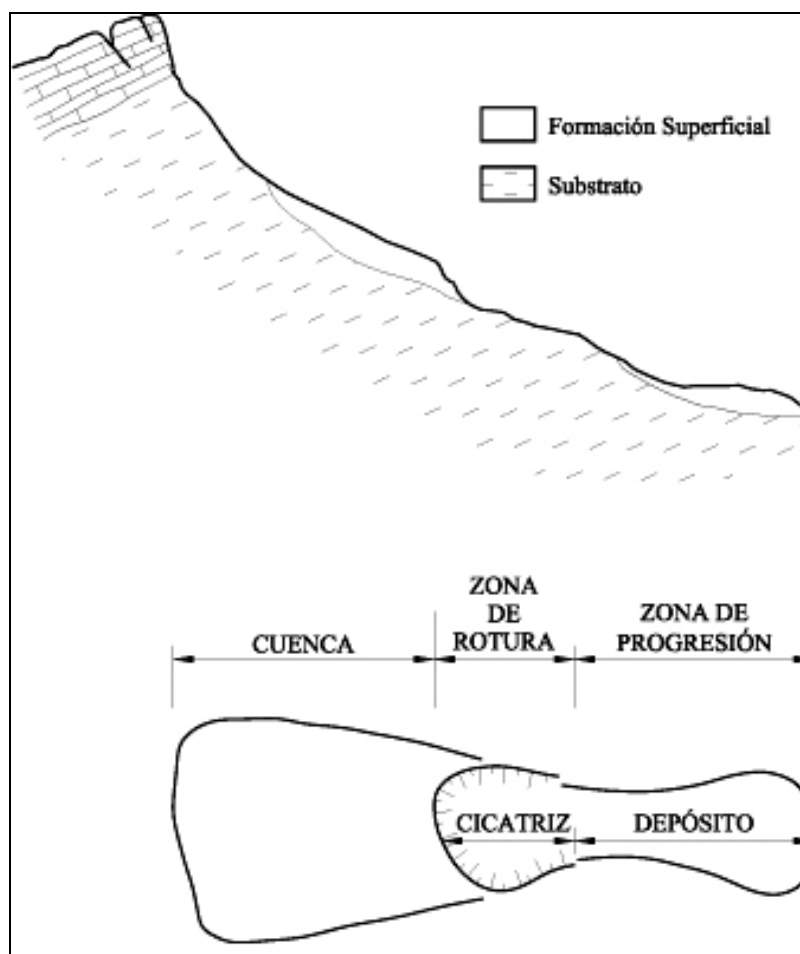


Figura 3.1: Esquema en perfil y en planta de la morfología de un deslizamiento superficial afectando a la formación superficial.

### 3.1.2. Hipótesis de rotura

En los reconocimientos de campo se observa que los deslizamientos superficiales no se distribuyen aleatoriamente, sino que su aparición en las laderas está controlada por ciertas condiciones locales relativas a la topografía, geometría, vegetación y litología presente en las mismas. En dos de las zonas de estudio (La Pobla de Lillet y Vallcebre) se detectó que las roturas no se generaban en las proximidades de las crestas (divisorias de agua) sino que se formaban a una cierta distancia ladera abajo variable en función de la presencia de vegetación (Corominas et al., 1992). En las laderas sin bosque (prados alpinos) o cubiertas por árboles dispersos, las roturas tienen lugar a distancias más próximas a la cresta que cuando la ladera está cubierta por bosque denso. Esto se interpreta en un doble sentido: por un lado se requiere

una dimensión mínima de cuenca para infiltrar una cantidad de agua suficiente que genere presiones de poros elevadas y produzca la rotura y, por otro lado, el papel estabilizador del bosque (si el bosque está presente, las raíces tienen un efecto estabilizador y es necesaria una mayor cuenca –mayor cantidad de agua infiltrada y/o mayor grosor de la formación superficial-).



Foto 3.1: Deslizamientos superficiales de La Pobla de Lillet.

La vegetación ejerce una influencia diferente según predomine el efecto favorecedor de la infiltración o de estabilización mediante las raíces (Greenway, 1987). En las dos zonas de estudio citadas se pudo comprobar que el número de deslizamientos superficiales era claramente mayor en zonas donde la cobertura vegetal era escasa o nula. Esto indica que el efecto estabilizador de las raíces es el predominante. Al tratarse de roturas de poco espesor, las raíces atraviesan la formación superficial para anclarse en el substrato y proporcionan una mayor cohesión y resistencia a la misma.

Sobre el terreno también se observa que las roturas se dan con preferencia en hondonadas y concavidades de la ladera. Las formas cóncavas tienden a concentrar tanto las aguas superficiales como las subterráneas y favorecen la acumulación de sedimentos, esperando encontrar en las hondonadas un mayor grosor de depósitos coluviales y la presencia de agua. Las roturas no hay que esperarlas en los interfluvios (laderas convexas) donde la formación superficial está ausente o está poco desarrollada y donde el agua diverge.

Por último, cabe comentar que la geometría de la cuenca ejerce una influencia directa en la aparición de rotura debido a varios factores. En primer lugar, la extensión de ésta dado que al aumentar la superficie de la cuenca lo hace también la cantidad de agua de lluvia recogida e infiltrada en el terreno, así como el volumen de formación superficial acumulada. En segundo lugar la pendiente, dado que al aumentar ésta aumentan las tensiones de corte en las superficies potenciales de rotura en el suelo, favoreciendo la inestabilidad. Finalmente, la pendiente media de la cuenca aguas arriba de los posibles puntos de rotura, influye de manera que, al disminuir la pendiente media se favorece la infiltración y la inestabilidad. Estos y

otros factores han sido puestos de manifiesto en diversos trabajos realizados en estas dos zonas (Corominas et al , 1988, 1990, 1992; Baeza, 1994).



Foto 3.2: Deslizamientos superficiales del área de Vallcebre.

Con esta experiencia previa sobre los deslizamientos superficiales se ha partido de una hipótesis de trabajo para realizar el análisis de susceptibilidad a la rotura por deslizamiento superficial. La hipótesis intenta orientar la selección de los parámetros que caracterizan las laderas así como su tratamiento y posterior interpretación.

La hipótesis parte de un modelo de ladera simple con las siguientes condiciones de contorno:

- La ladera está constituida por un substrato impermeable y no recibe aguas de infiltración procedentes de otras cuencas vecinas.
- Sobre el substrato se acumula una formación superficial (coluvión) permeable y susceptible a producir roturas. Cuando el substrato es de tipo arcilloso, la parte superior puede meteorizarse, desarrollando fisuras por donde se puede infiltrar el agua y dar lugar también a roturas.
- El elemento desencadenante de las roturas es el agua de lluvia que cae exclusivamente en la cuenca y se infiltra en la formación superficial o en el substrato alterado. El aumento de las presiones de agua en los poros es el responsable de la reducción de la resistencia al corte del suelo y de la rotura de la ladera.

Así, partiendo de esta hipótesis, aquellas laderas que no contuvieran formación superficial o substrato alterado no deberían observar roturas. Asimismo cuanto mayor sea la extensión y profundidad de la formación superficial mayor será la posibilidad de generar presiones de agua en los poros elevadas. En lo que respecta a las características geométricas



de la cuenca (dimensión, pendiente, forma, etc.) se espera que influyan tanto en la capacidad de recolectar el agua de lluvia como en la distribución de las tensiones en la ladera.



Foto 3.3: Deslizamiento superficial de la zona del Bajo Deba.

### 3.1.3 Variables utilizadas en el análisis

Teniendo en cuenta la hipótesis de rotura y el papel de los factores descritos en el apartado anterior, se ha procedido a la selección y captura de los parámetros geológico-geomorfológicos y de vegetación para su tratamiento mediante técnicas estadísticas. La utilización directa o combinada de estos parámetros genera un conjunto de variables con las que se intentará explicar la aparición de roturas en las laderas. A cada una de las variables se le atribuye de forma genérica un significado en relación a su papel en favorecer o reducir la posibilidad de rotura de la ladera, como por ejemplo, aumento de la resistencia del suelo, de la capacidad de infiltración del agua, etc.

Uno de los objetivos de la presente memoria ha consistido en la obtención automática o semiautomática del mayor número posible de variables que influyen (véase la Figura 3.2) en la estabilidad la ladera. Por este motivo, se ha procurado que la mayoría de variables utilizadas deriven del modelo digital de elevaciones (en adelante MDE). Únicamente dos o tres variables, según la zona, han sido obtenidas manualmente con un coste de tiempo mayor.

Las variables utilizadas se han clasificado según el tipo de información que proporcionan en los siguientes grupos:

- 1 localización de la rotura
- 2 modelo digital de elevaciones
- 3 geometría de la ladera
- 4 cuenca vertiente
- 5 uso del suelo

## 6 geología

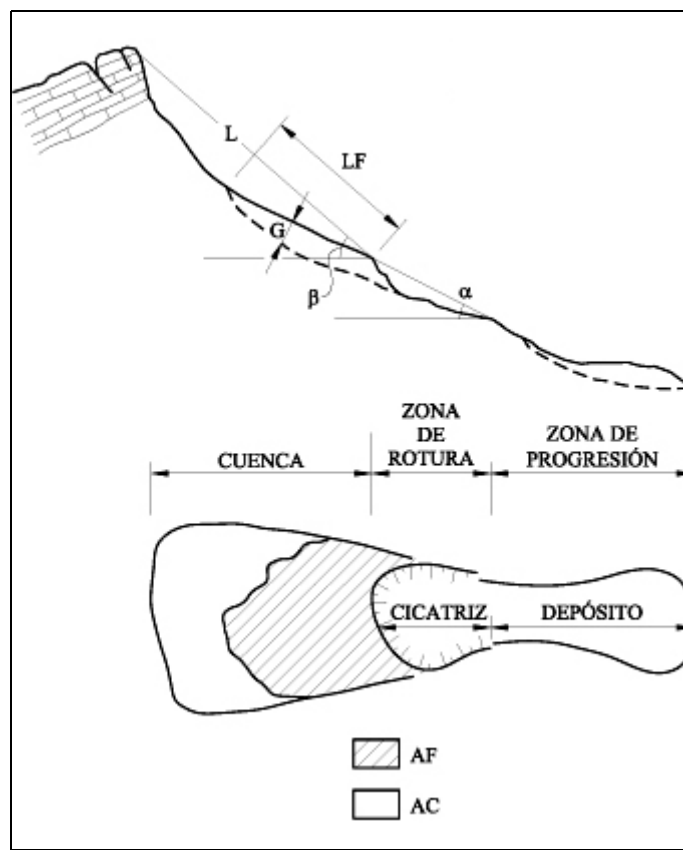


Figura 3.2: Esquema en perfil y en planta de un deslizamiento con los parámetros morfométricos (variables) utilizadas para el análisis (L: longitud de la cuenca; LF: longitud de la cuenca ocupada por la formación superficial; G: espesor de la formación superficial;  $\beta$ : pendiente media de la cuenca aguas arriba;  $\alpha$ : pendiente de la zona de rotura; AF: área de la cuenca ocupada por la formación superficial; AC: área de la cuenca).

Dentro de estos grupos temáticos, las variables referidas a la localización de la rotura, las de uso del suelo y las de geología son variables cualitativas obtenidas mediante fotointerpretación y trabajo de campo, mientras que el resto son cuantitativas y derivadas del MDE, a excepción de las variables AFS y LFS - área de cuenca acumulada de la formación superficial y longitud de cuenca acumulada de la formación superficial respectivamente -, que son variables mixtas obtenidas combinando una información vectorial con el modelo digital correspondiente. En la tabla 3.1 se muestran las variables utilizadas para los deslizamientos superficiales.

En los siguientes apartados se describen las variables y la función que se les atribuye. El procedimiento de obtención de las mismas y los metadatos se pueden consultar en el Anejo 1. Los mapas con cada una de las variables utilizadas para las tres zonas de estudio se pueden consultar en el Anejo 2.

## **1. Localización de la rotura**

### **Variable MOV**

#### **Definición**

Se trata de la variable Movimientos (será la variable de grupo para el análisis estadístico) que representa los deslizamientos superficiales que han sido identificados e inventariados en la zona de estudio. Es una variable en formato vectorial que utiliza un punto o un polígono para situar la zona de rotura de cada deslizamiento. Aunque indicar con un punto el inventario de roturas es suficiente para el análisis que se describe aquí, también se ha incorporado el polígono que delimita el deslizamiento (zona de rotura, transición y zona de acumulación de la masa movilizada). Es una variable cualitativa.

#### **Función**

La variable MOV se usa como variable de agrupación para el análisis estadístico. Es la variable que indica la existencia o ausencia de deslizamientos previos, permitiendo establecer las relaciones estadísticas con las variables condicionantes. Muestra las evidencias de deslizamientos pasados, a partir de los cuales es posible establecer la predicción.

## **2. Modelo Digital de Elevaciones**

### **Variable MDE**

#### **Definición**

Se trata de la variable Altitud sobre el nivel del mar de los puntos que forman la malla regular del Modelo Digital de Elevaciones. Es una variable cuantitativa continua medida en metros y con valores que dependen de la zona de estudio (zona cercana al mar, zona montañosa, etc.). Es la variable de la que se pueden derivar el resto de variables geométricas (en el caso que se utilice directamente ella como ocurre con la zona del Bajo Deba).

#### **Función**

La altitud tiene una estrecha relación con la pluviometría como han encontrado algunos autores (Carrara, 1983; Clotet, 1984; Baeza, 1994). En eventos previos se ha observado que a mayor altitud, mayor es la precipitación. Dependiendo de la zona de estudio y de la interpretación que se pueda hacer de esta variable, se puede utilizar o rechazar para el análisis. De ella derivan los modelos del terreno (variables) utilizados para el análisis.

### **Variable MDEFILL**

#### **Definición**

La variable MDEFILL es el Modelo Digital de Elevaciones Relleno, representando la altitud sobre el nivel del mar en metros. Este modelo es una corrección del MDE y se crea eliminando las depresiones y sumideros del MDE y obligando a la red de drenaje a conectarse, permitiendo que el agua tenga salida en cualquier parte del modelo. Sus valores dependerán de la zona de estudio (zona cercana al mar, zona montañosa, etc.) y son valores cuantitativos continuos. Por tanto es una variable derivada del MDE original, de la que se pueden derivar todas las variables geométricas de la ladera (es el caso de las zonas de La Pobra de Lillet y Vallcebre, aunque no el del valle del Bajo Deba). Si se utiliza éste modelo no se utiliza el MDE y a la inversa. Por tanto, las dos variables (MDE y MDEFILL) representan una sola variable.

<b>VARIABLES PRIMARIAS</b>			
<b>GRUPO</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>DEFINICIÓN</b>	<b>TOPOLOGÍA</b>
<b>Localización de la rotura</b>	MOV	Centroide de la zona de rotura de un movimiento	Punto
<b>Uso del suelo</b>	VEG	Densidad de vegetación y usos del suelo	Polígono
<b>Geología</b>	FMS	Presencia o ausencia de la formación superficial	Polígono
	GROSOR	Espesor de la formación superficial	Polígono
<b>MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES</b>			
<b>GRUPO</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>DEFINICIÓN</b>	<b>ESTRUCTURA</b>
<b>Elevación</b>	MDE	Altitud sobre el nivel del mar	Raster
	MDEFILL	Altitud sobre el nivel del mar corregida desde el punto de vista hidrológico	Raster
<b>VARIABLES DERIVADAS DEL MODELO DE ELEVACIONES</b>			
<b>GRUPO</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>DEFINICIÓN</b>	<b>ESTRUCTURA</b>
<b>Geometría de la ladera</b>	PEND	Pendiente de la ladera	Raster
	PENDS	Pendiente senoidal de la ladera	Raster
	ORIENT	Orientación o dirección de exposición de la ladera	Raster
	INSOL	Insolación o coeficiente de iluminación de la ladera	Raster
	RUGOS	Rugosidad o variación de la pendiente del terreno	Raster
	CURVAR	Grado de concavidad/convexidad del terreno	Raster
	PERFIL	Grado de concavidad/convexidad en la dirección de la pendiente	Raster
	PLA	Grado de concavidad/convexidad en la dirección transversal de la pendiente	Raster
<b>Cuenca vertiente</b>	ACUENCA	Área de cuenca acumulada	Raster
	LONG	Longitud máxima de cuenca acumulada ponderada con la pendiente	Raster
	AFS*	Área de cuenca acumulada ocupada por la formación superficial	Raster
	LFS*	Longitud máxima de la cuenca acumulada de la formación superficial	Raster
	PENDM	Pendiente media de la cuenca	Raster

Tabla 3.1: Variables utilizadas en los análisis de la susceptibilidad a los deslizamientos superficiales (\*:variables mixtas que precisan de una información previa en formato vectorial –topología polígono- para su derivación posterior de un MDE).



**Función**

Se trata de la misma función que en el caso de la variable MDE. Y como en el caso de MDE se puede utilizar o no, según la zona de estudio y de como se pueda interpretar la variable en el análisis.

**3. Características geométricas de la ladera****Variable PEND****Definición**

Se trata de la pendiente de la ladera en la zona de rotura definida como el ángulo existente entre la superficie del terreno y la horizontal. Su valor se expresa en grados de 0 a 90. Es una variable cuantitativa continua que deriva del MDE y, por tanto, en ARC/INFO se representa como una malla regular de puntos flotantes (que no tiene tabla VAT de atributos asociada).

**Función**

La pendiente está muy relacionada con la aparición de roturas dado que es el principal factor geométrico que aparece en los análisis de estabilidad. La variable se relaciona directamente con las tensiones de corte tangenciales y normales en la formación superficial, e influye también en la distribución de agua en la ladera (Jones et al., 1961; Moser et al., 1983; Oyagi, 1984; Mulder, 1991).

**Variable PENDS****Definición**

PENDS es la pendiente senoidal de la ladera definida como el seno del producto de la pendiente por el valor constante 2. Es una variable cuantitativa y continua derivada del MDE y que en ARC/INFO se representa como una malla regular de puntos flotantes. Esta variable es una transformación matemática senoidal de la anterior (PEND).

**Función**

Se trata de crear una nueva variable que se ajuste mejor al comportamiento de la pendiente respecto a las zonas de rotura de los deslizamientos superficiales. Ocurre que cuanto mayor es la pendiente mayor debería ser la susceptibilidad a la rotura de la formación superficial. Sin embargo, se observa que a partir de 45° ocurre lo contrario y la pendiente de la ladera es demasiado empinada para retener la formación superficial. Por este motivo, en las pendientes elevadas sólo aflora el substrato rocoso y la posibilidad de aparición de roturas se reduce drásticamente. Este comportamiento puede reproducirse mediante una función senoidal dando buenos resultados en análisis estadísticos de susceptibilidad a los deslizamientos (Baeza, 1994). Añadir esta nueva variable, llamada PENDS, a la lista de variables a analizar, puede ser útil en algunas zonas pero no en todas, debiendo valorarse su introducción.

**Variable ORIENT****Definición**

Es la variable Orientación, definida como la dirección de exposición de la ladera en un punto y que representa la dirección de la máxima pendiente calculada para cada celda. Se calcula a

partir del ángulo existente entre el norte geográfico y la proyección sobre el plano horizontal del vector normal a la superficie en un punto dado. Se trata de una variable derivada del MDE, cuantitativa, continua y con un rango de valores de 1 a 360 grados aunque también se puede encontrar el valor de -1 para aquellas celdas de pendiente 0. En ARC/INFO se representa como una malla regular de puntos flotantes.

### **Función**

La orientación indica de manera indirecta la situación de una ladera en cuanto a su insolación y, por lo tanto, si una ladera se encuentra húmeda o seca con mayor frecuencia. También se puede interpretar en términos de cantidad de vegetación (por ejemplo en zonas umbrías suele existir más bosque o matorral y una mayor estabilidad de la formación superficial por la presencia de raíces). La orientación de la ladera también influirá en la cantidad de lluvia recibida, según la dirección de avance de los frentes nubosos.

### **Variable INSOL**

#### **Definición**

La variable Insolación se define como el coeficiente de iluminación o intensidad reflejada de la superficie terrestre. Se deriva del MDE adoptando un rango de valores comprendido entre 0 y 255. Valor 0 significa sombra y 255 la máxima insolación. Estos valores son definidos por el algoritmo, donde 255 significa el valor máximo de colores en celdas que permite un determinado software). Es una variable generada en GRID (módulo que trabaja en formato raster del SIG ARC/INFO) como una malla regular de puntos flotantes (ver Anejo 1 para consultar el algoritmo utilizado).

#### **Función**

La variable muestra el tiempo en que las zonas se encuentran en la sombra (más húmedas) o al sol (más secas y expuestas a cambios bruscos de la cantidad de agua en el suelo debido a lluvias). Variable relacionada con la humedad. Se le supone, con matices, un papel similar al que pueda ejercer la orientación de la ladera.

### **Variable RUGOS**

#### **Definición**

La Rugosidad del terreno se define como la variación de la pendiente en un área (en este caso de 3 \* 3 celdas) y representa la desviación del vector normal a la superficie en cada celda. Se deriva del MDE, es una variable cuantitativa y continua, con un rango de valores normalizados de 0 a 1. El valor 1 corresponde a rugosidad nula y los valores se hacen menores al aumentar la dispersión de los vectores (alta rugosidad). Normalmente los valores oscilan entre 0.7 y 1 (en el Anejo 1 se puede observar el algoritmo utilizado)

#### **Función**

La rugosidad define bien formas como los límites de taludes y laderas tanto en los valles como en las crestas (Felicísimo, 1992). Se relaciona con los deslizamientos de manera que laderas de rugosidad alta son más propensas a presentar deslizamientos debido a que los cambios sucesivos de pendiente favorecen una mayor infiltración del agua en el terreno y su inestabilidad.

### **Variable CURVAR**

#### **Definición**

Indica el grado de Convexidad/Concavidad del terreno. Se determina mediante el radio de curvatura de la celda según un plano vertical. Se define como la tasa de cambio de la pendiente y depende de las derivadas de segundo grado de la altitud (figura 3.3). La variable deriva del MDE, siendo cuantitativa continua, con un rango de valores cambiante según la zona y, por lo tanto, del MDE utilizado pero que oscila entre -20 y 20 de unidades 1/100 metros. El valor 0 en una celda corresponde a una superficie plana formada entre la celda en cuestión y sus ocho celdas vecinas, valores positivos indican que la superficie es convexa hacia la celda y valores negativos indican concavidad hacia la celda. La variable se genera en GRID como una malla regular de puntos flotantes.

### **Función**

La variable se relaciona con los deslizamientos en la medida en que indica el grado de concentración o dispersión del drenaje superficial. En las zonas cóncavas el flujo se concentra hacia la celda mientras que se dispersa en las convexas. En las primeras es de esperar un aumento de la presión de agua en los poros y una mayor acumulación de formación superficial, elementos que favorecen la aparición de deslizamientos superficiales. Una curvatura cóncava es más efectiva en la captación de agua de lluvia (Carrara, 1983; Oyagi, 1984; Smith, 1988; Gao, 1993). Algunos estudios sugieren que los deslizamientos superficiales ocurren principalmente en convergencias topográficas donde se concentra el flujo subterráneo, tales como depresiones canalizadas y hondonadas (Dietrich and Dunne, 1978; Swanson et al, 1981; Swanson and Frediksen, 1982; Sidle et al., 1985; Montgomery and Dietrich, 1994; Baeza, 1994).

### **Variable PERFIL**

#### **Definición**

Determina el grado de convexidad o concavidad de la superficie en la dirección de la pendiente (longitudinal). Se deriva del MDE y adquiere un rango de valores según la zona y por lo tanto, del MDE utilizado, que oscila entre - 20 y 20 de unidades 1/100 metros, siendo por tanto, una variable cuantitativa y continua. El valor 0 indica que la superficie es plana, valores positivos indican que la superficie es convexa hacia la celda y valores negativos indican concavidad hacia la celda. Es una variable generada mediante el módulo GRID como una malla regular de puntos flotantes.

#### **Función**

Como ocurre con la variable CURVAR, indica la efectividad de la topografía para concentrar o dispersar la mayor cantidad de agua de lluvia en un punto determinado de la ladera. Dado que representa el relieve según la dirección de la máxima pendiente, esta variable afecta a la infiltración y la escorrentía y a la aceleración y deceleración del flujo, y por tanto influye en la erosión y deposición.

### **Variable PLA**

#### **Definición**

Representa el grado de convexidad o concavidad transversal de la superficie del terreno (en la dirección perpendicular a la pendiente). Es una variable cuantitativa y continua que se deriva del MDE y adquiere un rango de valores distinto según la zona y, por lo tanto, del MDE utilizado, que oscila entre - 20 y 20 de unidades 1/100 metros. El valor 0 indica que la superficie es plana, valores positivos indican que la superficie es convexa hacia la celda y

valores negativos indican concavidad hacia la celda. La variable se genera mediante el subprograma GRID como una malla regular de puntos flotantes.

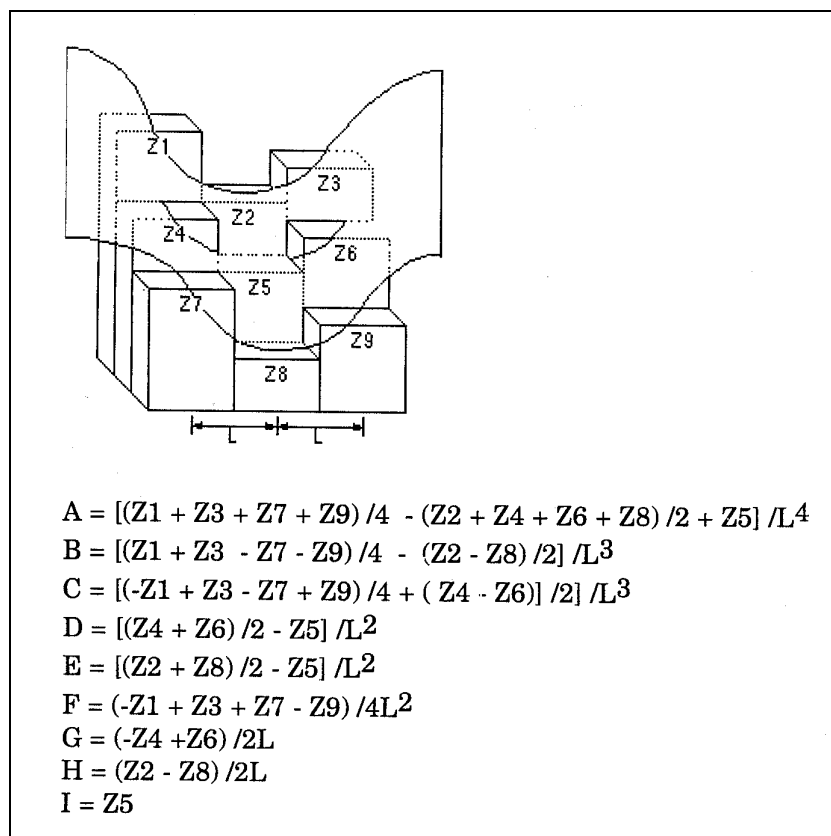


Figura 3.3: Esquema y expresiones para el cálculo de la curvatura (ESRI, Grid commands 1994).

### **Función**

Esta variable tiene la misma función que CURVAR y PERFIL. Hace referencia a la convexidad o concavidad transversal de la ladera. Expresa la convergencia o divergencia del flujo hacia la celda.

## **4. Características de la cuenca vertiente**

### **Variable ACUENCA**

#### **Definición**

Corresponde a la superficie de la cuenca aguas arriba de la celda. Es el sumatorio de la superficie de las celdas que vierten a una celda determinada (cuenca acumulada). La variable se deriva del MDE y muestra rango de valores que oscila entre 0 e infinito. Si bien es una variable cuantitativa, los valores de la superficie son múltiplos del área de una celda, no tratándose de una variable continua. La superficie se expresa en metros cuadrados.

#### **Función**

El área cuenca se relaciona con la cantidad de agua que es capaz de recoger e infiltrar en el terreno. A mayor superficie más agua infiltrada y más posibilidades de producir roturas (Neuland, 1976; Hatano, 1976; Okimura, 1983; Oyagi, 1984). El área de la cuenca ha

demostrado ser un parámetro que influye mucho en la aparición de inestabilidades en las laderas (Zaruba y Mencl, 1969).

### **Variable LONG**

#### **Definición**

La variable indica la longitud máxima de la cuenca acumulada aguas arriba de una celda. Se trata de la longitud medida sobre la superficie del terreno y no de su proyección horizontal. Por este motivo, la longitud de cada celda se pondera con la pendiente de la misma. La variable cuantitativa se deriva del MDE con un rango de valores que oscila entre el 0 e infinito. La longitud se expresa en metros.

#### **Función**

Esta variable da una indicación del tamaño de la cuenca acumulada, la capacidad de la misma para concentrar agua subterránea y de la posible acumulación de sedimentos (formación superficial). Se ha observado una relación muy estrecha entre la frecuencia de deslizamientos causados por lluvias torrenciales y la distancia a la cresta (Takeshita, 1971; Carrara et al., 1977; Oyagi, 1984). Las celdas próximas a una cresta muestran menos roturas que las alejadas.

### **Variable AFS**

#### **Definición**

La variable AFS expresa el área ocupada por la formación superficial aguas arriba de la celda considerada. Al igual que la variable ACUENCA se obtiene sumando la superficie de aquellas celdas que contienen formación superficial y que vierten a la celda (superficie de la cuenca acumulada). Se trata de una variable que podríamos considerar mixta dado que precisa de una información obtenida inicialmente en formato vectorial (la variable FMS) junto con la superficie de cuenca obtenida a partir del MDE. El rango de valores oscila entre 0 e infinito. Aunque es una variable cuantitativa sus valores son múltiplos del área de una celda. Los valores se expresan en metros cuadrados.

#### **Función**

Los deslizamientos superficiales afectan mayoritariamente a las formaciones superficiales. La variable AFS expresa la extensión de la zona donde se infiltra el agua en la formación superficial. Es de esperar que, a mayor área, mayores sean las presiones de agua en los poros y la posibilidad de producir roturas.

### **Variable LFS**

#### **Definición**

La variable LFS indica la longitud máxima de la parte de la cuenca que contiene formación superficial aguas arriba de una celda. Se trata de la longitud medida sobre la superficie del terreno y no de su proyección horizontal. Por este motivo, la longitud de cada celda se pondera con la pendiente de la misma. Expresa la máxima longitud de la formación superficial existente aguas arriba de una celda y perteneciente a la cuenca de drenaje de la misma. Por este motivo utiliza sólo aquellas celdas donde existe formación superficial. Es una variable mixta dado que precisa de información obtenida inicialmente en formato vectorial (la variable FMS) para luego calcular la distancia del recorrido máximo del flujo derivado a partir del MDE. La variable cuantitativa tiene un rango de valores que oscila entre el 0 e infinito. La longitud se expresa en metros.

**Función**

Se le atribuye una función similar a la variable AFS. Expresa la extensión de la zona donde se infiltra el agua en la formación superficial. Es de esperar que, a mayor área, mayores sean las presiones de agua en los poros y la posibilidad de producir roturas.

**Variable PENDM****Definición**

La variable PENDM es la Pendiente Media de la Cuenca aguas arriba de la celda considerada. Se define como el valor medio de la pendiente de la cuenca siguiendo el recorrido de las líneas de flujo acumulado. La pendiente se calcula según la línea de longitud máxima de la cuenca para cada celda. La variable deriva del MDE tomando un rango de valores que oscila entre 0 y 90 grados. Es una variable cuantitativa y continua.

**Función**

La pendiente media de la cuenca vertiente expresa la capacidad que tiene la misma para favorecer la infiltración del agua en el subsuelo y por tanto, la inestabilidad. Pendientes medias bajas deberían favorecer la infiltración y la aparición de roturas (Baeza, 1994).

**5. Usos del suelo****Variable VEGET****Definición**

La variable VEGET hace referencia a la vegetación o cobertera vegetal que cubre el suelo de la zona de estudio. Se considera desde el punto de vista de la densidad de vegetación (aunque también refleja los principales estratos vegetales como el bosque, prado, matorral, etc. y tipo de vegetación). También incluye el uso del suelo puesto que contempla dentro de sus categorías los prados y terrazas antrópicas, núcleos urbanos, explotaciones a cielo abierto y escombreras. Es una variable cualitativa obtenida de forma manual representada mediante una cobertura vectorial de polígonos en ARC/INFO. Según la zona la variable presenta entre 7 y 8 categorías que serán ponderadas para el análisis estadístico según la relación entre el tipo y densidad de vegetación y la estabilidad de la ladera.

**Función**

La cobertera vegetal (tipo de cobertera) y su densidad influyen en la estabilidad de la formación superficial mediante mecanismos que se pueden clasificar como hidrológicos y mecánicos. Los hidrológicos comprenden la capacidad de infiltración en el suelo, la humedad del suelo, la evapotranspiración, etc., mientras que los mecánicos traducen el aumento de resistencia que proporcionan las raíces y la protección frente a la erosión (Geenway, 1987; Mulder, 1991). La vegetación puede influir de manera beneficiosa o adversa en la estabilidad de las laderas, dependiendo de cómo actúen los mecanismos mencionados (Baeza, 1994). Un ejemplo de ello es mientras que las raíces aumentan la resistencia del suelo, al mismo tiempo favorecen una mayor infiltración del agua de lluvia.

**6. Geología****Variable FMS**



**Definición**

La variable Formación Superficial define la presencia o ausencia de la formación superficial en la celda. Es una variable cualitativa obtenida de forma manual constituyendo una cobertura vectorial de polígonos en ARC/INFO. Es una variable binaria con sólo dos valores: 1 para celdas sin formación superficial y 2 para celdas donde existe formación superficial.

**Función**

Este parámetro se relaciona con la presencia de deslizamientos superficiales dado que la mayor parte de ellos afectan a la formación superficial. En formaciones arcillosas puede formarse un nivel superior de alteración que puede verse afectado por roturas. En este caso, los deslizamientos no estarán asociados a la presencia de formación superficial. La inclusión de la variable Litología puede ayudar a explicar estas situaciones. La variable se utiliza, junto con el MDE, para obtener las variables derivadas LFS y AFS.

**Variable GROSOR****Definición**

La variable GROSOR expresa el espesor de la formación superficial (depósitos superficiales y regolitos de alteración). Es una variable cualitativa obtenida de forma manual y representada en una cobertura vectorial de polígonos en ARC/INFO. Las categorías de esta variable oscilan entre 3 y 4 según la zona de estudio (sin formación superficial, de 0.1 a 0.5 metros de espesor, más de 0.5 metros de espesor, etc.). Para el análisis estadístico estas categorías se han ponderado en valores numéricos. En la zona de Vallcebre no se dispone de esta variable.

**Función**

El espesor de la formación superficial influye en la cantidad de agua que puede contener y en la magnitud de las presiones que pueden generarse. Asimismo un gran espesor puede reducir el efecto estabilizador de las raíces.

**3.2 ZONAS DE ESTUDIO**

Para el análisis de susceptibilidad del terreno a los deslizamientos superficiales se han seleccionado 3 áreas piloto en las que se aplicará las técnicas multivariantes de tipo discriminante. Estas áreas son La Pobla de Lillet y Vallcebre en el Prepirineo Oriental (Barcelona) y el valle del Bajo Deba en Guipúzcoa.

Se ha observado que las condiciones meteorológicas influyen en el tipo y densidad de roturas de las laderas. Así, lluvias de gran intensidad y corta duración originan numerosos deslizamientos superficiales (Onodera et al, 1974; Lumb, 1975; Brand, 1985; Naden et al, 1991; Corominas y Moya, 1999). Este tipo de precipitaciones modifican las condiciones de estabilidad de la ladera al provocar un aumento brusco de las presiones de agua en los poros que, a su vez, reduce considerablemente la resistencia al corte del suelo.

En las áreas Mediterráneas las situaciones críticas para la estabilidad de laderas se dan con cierta frecuencia, debido a la presencia de un mar cálido junto a una orografía abrupta que favorece las tormentas convectivas. Las masas de aire cálido y húmedo procedente del Mediterráneo se internan a través de los valles de los ríos hasta alcanzar la cordillera

pirenaica, siendo forzadas a un ascenso rápido, descendiendo su temperatura provocando la correspondiente condensación. Pero es necesario otro componente para justificar las precipitaciones de gran intensidad, siendo éste un frente frío o una gota fría. El encuentro entre una masa de aire caliente y un frente frío produce una brusca condensación y la consiguiente precipitación. Las precipitaciones registradas en tales condiciones superan los 200 mm/día. La magnitud de estos eventos se pone de manifiesto al compararlos con los valores medios de lluvia anual: 500-600 mm/año en la región mediterránea y 800-1400 mm/año en el área pirenaica (Novoa, 1984).

En Noviembre de 1982 tuvieron lugar precipitaciones intensas que afectaron de forma general al Pirineo Oriental, donde se enmarcan dos de las zonas de estudio (La Pobla de Lillet y Vallcebre), siendo responsables de inundaciones catastróficas y de innumerables roturas de laderas (Gallart y Clotet, 1988). Las precipitaciones, con una duración de dos días (7 y 8 de Noviembre), fueron de una magnitud excepcional con registros de 555,8 mm en 48 horas en la Molina y 300 mm en La Pobla de Lillet (Martín Vide y Raso 1983).

Así pues, las zonas de La Pobla de Lillet y Vallcebre se han seleccionado debido a la información (deslizamientos existentes) que se dispone de estas dos áreas. La zona del Bajo Deba (Guipúzcoa) ha sido seleccionada para aplicar la metodología de análisis de los deslizamientos de tipo superficial a una zona con un contexto climático y orográfico distinto al del Prepirineo Oriental.

En los siguientes apartados se describen brevemente la situación geográfica y geológica de las tres zonas. Los mapas con las variables para cada una de las zonas de estudio se muestran en el Anejo 2.

### **3.2.1. La Pobla de Lillet**

La zona de estudio (figura 3.4) corresponde a un área de la cuenca alta del río Llobregat (comarca del Berguedà), situada geográficamente en el sector meridional del Prepirineo Oriental, cubriendo una extensión de aproximadamente 40 Km<sup>2</sup>. En ella se encuentran las poblaciones de La Pobla de Lillet y de Castellar de N'Hug, cerca del nacimiento del río Llobregat.

Las litologías que afloran en este área son de carácter eminentemente carbonatado con edades que van desde el Devónico medio hasta el Eoceno medio. Éstas se distribuyen en diferentes unidades estructurales (Unidad del Cadí y manto del Pedraforca) caracterizadas por una tectónica alpina (véase figura 3.5), y ocupan franjas del relieve dispuestas en sentido E-W.

A continuación se describen, de forma sintética, los diferentes materiales aflorantes en la zona de estudio (ITGE, 1994; Busquets, 1981; Clotet, 1984):

Zócalo hercínico:

- Devónico medio-superior: conjunto eminentemente carbonatado, formado por una alternancia de calizas (micríticas y nodulosas) y lutitas carbonatadas.

Unidad del Cadí:

- Pérmico: tramo continental constituido por lutitas rojas, areniscas y conglomerados. En la zona de estudio, el tramo con mayor representación corresponde a la denominada Unidad Roja Inferior, caracterizada igualmente por una alternancia de conglomerados, areniscas lutíticas y lutitas cineríticas rojas.



- Eoceno medio: tramo formado por margas azules, niveles de areniscas de tipo turbidítico y lentejones de yesos.

Materiales cuaternarios:

- Pleistoceno-Holoceno: son los materiales cuaternarios que recubren parcialmente la zona de estudio, constituyendo los depósitos formados por los cursos fluviales y los ligados a procesos de ladera. Las formaciones aluviales constituyen terrazas que se caracterizan por depósitos limpios, heterométricos formados por gravas y bloques poligénicos que pueden alcanzar más de un metro de diámetro. Las formaciones torrenciales tienen una distribución local y están asociados a conos de deyección. Son depósitos heterométricos con abundantes gravas y bloques envueltos en matriz arcillosa. Por último, los materiales coluviales se caracterizan por ser depósitos heterométricos de bloques y gravas con abundante matriz limo-arcillosa.

La distribución de los deslizamientos en esta zona está controlada, además de las condiciones morfológicas e hidrológicas, por la litología. Las unidades litoestratigráficas que con mayor frecuencia muestran fenómenos de inestabilidad son: en primer lugar las formaciones coluviales recientes; el *Cretácico superior-Paleoceno* donde los niveles de arcillas y areniscas rojas experimentan roturas preferentemente de tipo rotacional y traslacional; el *Eoceno inferior* que conteniendo margas y margocalizas caracterizadas por una marcada esquistosidad permite la aparición de roturas de tipo planar favorecidas por discontinuidades tales como la estratificación o la diaclasación. También se generan corrientes de derrubios en los niveles superficiales altamente meteorizados de la formación margosa. (Corominas, 1989; Corominas y Baeza, 1991).

Los deslizamientos superficiales objeto de estudio afectan mayoritariamente a las formaciones cuaternarias de tipo coluvial y, en menor medida, a los niveles meteorizados de las arcillitas del Permotrias, arcillitas del Cretacico superior y turbiditas del Eoceno .

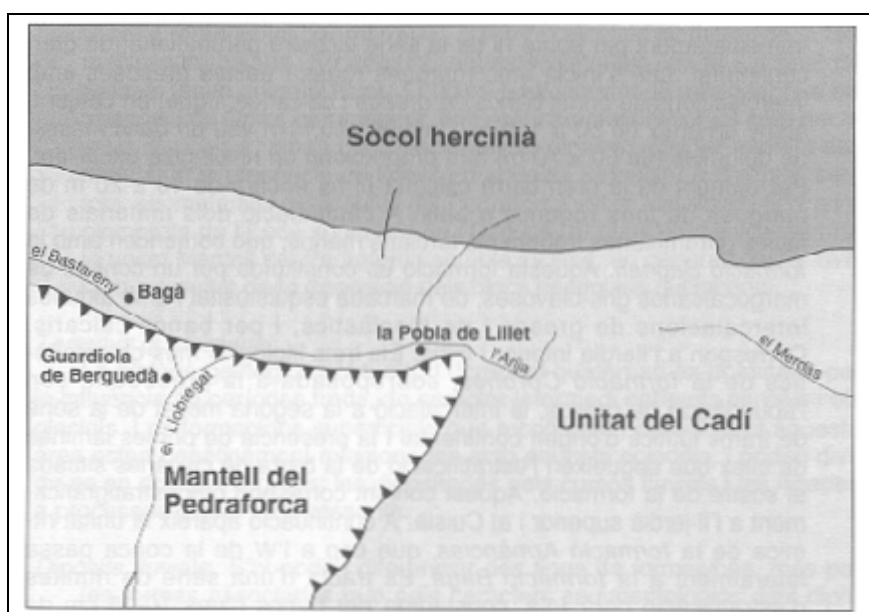


Figura 3.5: Unidades estructurales de la zona de la Poble de Lillet (ICC, 1994) (leyenda: mantell: manto; unitat: unidad; sòcol: zócalo).

### 3.2.2. Vallcebre

Geográficamente esta zona se encuentra relativamente cerca de la anterior, situada en la cuenca alta del río Llobregat (figura 3.6) en el Prepirineo Oriental (Barcelona). La zona cubre una extensión de unos 49 km<sup>2</sup> y está constituida por la Cuenca de Vallcebre y la parte baja del río Saldes afluente del Llobregat. Al oeste de la zona se elevan los relieves de la Serra de Ensija y al Norte los de la Serra del Cadí-Moixeró. Una parte de la zona está afectada por las excavaciones a cielo abierto de la explotación de lignitos que afloran al pie de la Serra d'Ensija y que no se han considerado en el análisis. El área comprende las poblaciones de Vallcebre, Maçaners y Sant Corneli.

La zona de estudio se encuentra situada geológicamente en el manto del Pedraforca. Los relieves de la cuenca de Vallcebre están excavados sobre el sinclinal del mismo nombre y sobre el flanco del anticlinal que forma parte de la Serra d'Ensija (figura 3.7). Estructuralmente es una zona formada por pliegues con vergencia sur, afectados localmente por una fracturación poco desarrollada.

Los materiales que constituyen esta zona forman parte de la serie de edad Maastrichtiense y fácies Garumniense del Manto alóctono del Pedraforca. Resumidamente los materiales que se encuentran en la zona son (según Aepler, (1968) en Balasch, 1986):

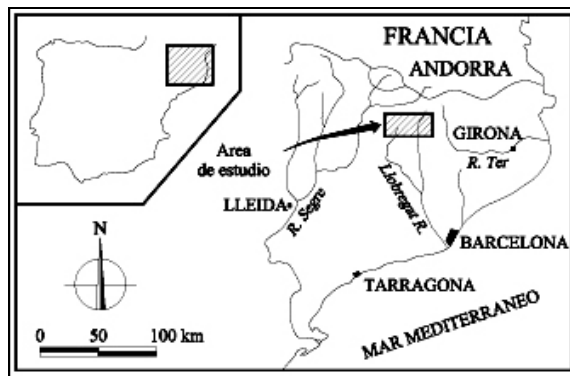
- Calizas y calcarenitas con bioconstrucciones como base de margas arenosas grises del Maastrichtiense (Cretácico superior)
- Materiales de la Fácies Garumniense (Cretácico superior-Paleoceno inferior) de carácter continental regresivo y constituidos de abajo a arriba por:
  - Serie de calizas inferior formada por calizas y margocalizas con fósiles (20-30m)
  - Serie de margas inferior con niveles lignitíferos finalizada con niveles de areniscas conglomeráticas y conglomerados cuarzosos (400-500m)
  - Serie de calizas intermedias con algún nivel intercalado de margas grises (40-75m)
  - Serie de margas intermedias con intercalaciones de yeso finalizando con algún paquete de areniscas y calizas arenosas (100-150m)
  - Serie de calizas superior donde alternan los niveles de calizas con margas de color gris y marrón (20-40m)
  - Serie de margas superior ricas en arena y margas rojas con alguna intercalación de yeso (250m)
- Conglomerados del Eoceno superior – Oligoceno inferior con disposición discordante.
- Materiales del Pleistoceno-Holoceno constituidos en la zona básicamente por depósitos fluviotorrenciales en los lechos de los ríos (Saldes, Vallcebre, etc) y materiales coluviales indiferenciados, que en las zona de Vallcebre están constituidos por depósitos de granulometría heterogénea formando parte de materiales movilizados por diversos tipos de deslizamientos.

La distribución de los deslizamientos en la zona está controlada por la presencia de las margas y la formación superficial cuaternaria principalmente. La disposición de la formación superficial, que forma una película casi continua sobre el substrato margoso, hace que el terreno natural presente una discontinuidad casi paralela a la superficie del terreno y situada en el contacto de ambos materiales. La diferencia de permeabilidad entre estos materiales



favorece la formación de deslizamientos superficiales, fundamentalmente de tipo planar-traslacional asociados a zonas con fuerte pendiente (Baeza, 1994). Los deslizamientos de tipo rotacional se producen en márgenes empinados de torrentes, donde la sobreexcavación acelera el proceso de inestabilidad. Por otro lado, las coladas se producen en algunas zonas canalizadas en los lechos que se forman en las áreas cóncavas (Baeza, 1994).

A)



B)



Figura 3.6: Situación de la zona de Vallcebre: A) general y B) localización detallada (Fuente: ICC, Mapa comarcal de Catalunya, 1:50.000, Berguedà-14, 1994).





### 3.2.3. Valle del Bajo Deba

El área de estudio se localiza en la parte baja del valle del Deba (Guipúzcoa, País Vasco) (figura 3.8), valle que incluye los municipios de Deba, Mendaro, Elgoibar y Eibar. El área estudiada cubre aproximadamente 20 km<sup>2</sup> de extensión, está situada en el sector oriental de la cornisa Cantábrica y presenta carácter montañoso, con altitudes entre 0 y 600 m en valles cuya disposición general es ONO-ESE siguiendo la estructura geológica. En la zona de estudio se encuentra la población de Itziar.

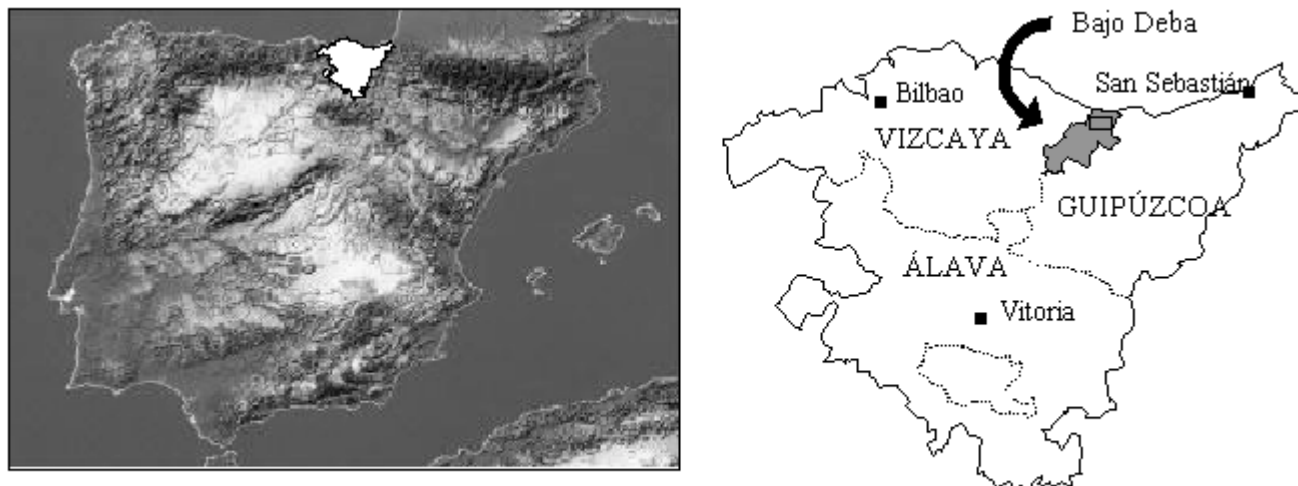


Figura 3.8: Situación del área del Bajo Deba (País Vasco). La imagen de la izquierda muestra la situación del País Vasco dentro de la Península Ibérica. A la derecha se muestra un croquis del País Vasco con la ubicación del área del Bajo Deba en gris, de la que se dispone de MDE y la zona concreta de estudio delimitada por un rectángulo dentro de la misma.

La zona de estudio pertenece al Pirineo Vascoantabárico que es la prolongación occidental de la Cadena Pirenaica con una estructura general semejante a la de un prisma de acreción engrosado hacia el norte. El área de estudio está enclavada en el Dominio del Arco Vasco (entre la falla de Bilbao por el sur y el mar Cantábrico por el norte) y afloran en él dos grandes estructuras: el sinclinatorio Vizcaíno (figura 3.9) y la Banda Alóctona de Lekeitio-Tolosa que se extiende al norte de la falla de Leiza y que está constituida por una serie de unidades tetónicas apiladas hacia el norte (complejo Urganiano y Supraurgoniano). Se trata de una zona moderadamente plegada y fracturada, formada por diferentes tipos de calizas, margas, arcillas, areniscas, facies tipo flysch y rocas volcánicas, correspondientes al Cretácico y Paleógeno de los Pirineos Vascoantabáricos.

Los materiales del substrato que se pueden encontrar en la zona del Bajo Deba son (EVE, 1995):

#### Complejo Urganiano

*Limolitas calcáreas y margas esquistosas grises azuladas.* Incluyen también calizas margosas nodulosas, lutitas calcáreas y areniscas calcáreas. El color de alteración es pardo-amarillento.

*Calizas arrecifales.* Son calizas arrecifales, bioclásticas, con rudistas y corales dominantes. En la serie se intercalan, esporádicamente, ortobrechas calcáreas, “grainstones”, bioclásticos, etc.

*Calizas margosas* (calizas impuras). Son calizas margosas gris oscuro a negras, tableadas, y afectadas por una intensa esquistosidad. Se trata de facies de transición de las calizas arrecifales de plataforma a facies más terrígenas y/o margosas.

*Areniscas silíceas y lutitas.* Afloran en forma de orla de las calizas urgonianas.

*Lutitas (limolitas algo calcáreas) negras* azoicas (margas de Itziar) y hacia techo intercalan areniscas silíceas. Equivalentes laterales de las calizas urgonianas. Son generalmente lutitas grises y negras, estratificados en bancos finos y medios, con buenos afloramientos a lo largo de la autopista Bilbao-Behobia.

*Orto- y para-(mega)brechas calcáreas.* Matriz carbonatada y/o terrígena. Generadas caídas de rocas en escarpes sinsedimentarios.

#### Complejo Supraurgoniano

*Lutitas negras con intercalaciones de areniscas turbidíticas* clásicas (Flysch Negro o Formación Deba).

#### “Flysch” del Cretácico Superior

*Alternancia de margas y margocalizas* (Flysch calcáreo). Son margas algo limosas grises oscuras y azuladas, muy esquistosas y con algo de pirita diseminada, que ocasionalmente, intercalan bancos delgados de calizas micríticas de color gris oscuro, blancas en superficie de alteración. Hacia el techo, son cada vez más frecuentes los bancos de calizas arenosas. Presentan numerosos episodios de resedimentación, con brechas, olistolitos, “slumps”, etc.

Rocas Ígneas. Afloran en los municipios de Eibar y Elgoibar:

*Sils básicos* (subvolcánicos). Afloran en Elgoibar y son “sills” ultramáficos (picríticos) que intruyen a rocas sedimentarias. Es una roca microgranuda, compacta y densa. Aparecen diaclasadas por diversos grupos de fracturas (con presencia de crisotilo) que individualizan bloques paralelepípedos que por alteración adquieren aspectos redondeados.

*Coladas volcánicas masivas, semimasivas, “pillows”.* Intercaladas entre materiales sedimentarios y volcanoclásticos. Las coladas masivas afloran en la zona de Malzaga y composicionalmente corresponden a basaltos, andesitas basálticas y traquibasaltos, en parte afectados por alteraciones de carácter espilitico. Coladas con disyunción columnar afloran en una pequeña colada entre Malzaga y Elgoibar. La composición petrográfica corresponde a basaltos-traquibasaltos alterados (espilitizados). Las “pillows” son frecuentes en los alrededores de Elgoibar. Corresponden a rocas basáltico-espiliticas de textura amigdaloides.

*Rocas volcanoclásticas, brechas volcánicas.* Aparecen en estrecha relación con las “pillows” (brechas volcánicas) o interestratificados entre materiales sedimentarios (volcanoclásticas: “lapillistone”, tobas groseras y finas).

*Alternancia de calizas arenosas y margas.* La litología dominante consiste en margas y lutitas calcáreas, limosas, gris oscuro, que alternan en proporción variable con calizas arenosas de grano fino, estratificadas en bancos de potencia variable. Ocasionalmente se intercalan

niveles de caliza micrítica. Nota: Aquí se sustituye por margocalizas y calizas con algunos paquetes de margas. Las margas oscilan entre 0,3 y 1 m de espesor.

*Alternancia de margas y calizas arenosas.* La litología dominante consiste en margas y lutitas calcáreas, limosas, gris oscuro, que alternan en proporción variable con calizas arenosas de grano fino, estratificadas en bancos de potencia variable. Ocasionalmente se intercalan niveles de caliza micrítica.

Tránsito Cretácico Terciario.

*Alternancia de margocalizas grises, rojas y margas.* Son margocalizas y margas masivas y estratificadas de tonalidades grises y rojizas que esporádicamente intercalan lechos turbidíticos.

Eoceno

*Alternancia de calizas arenosas, areniscas y lutitas.* Son materiales turbidíticos. Se trata de una alternancia de calizas arenosas, generalmente descalcificadas, areniscas y lutitas. Las areniscas, de color de alteración amarillento y cemento calcáreo, se agrupan en bancos potentes (arena hasta tamaño grueso).

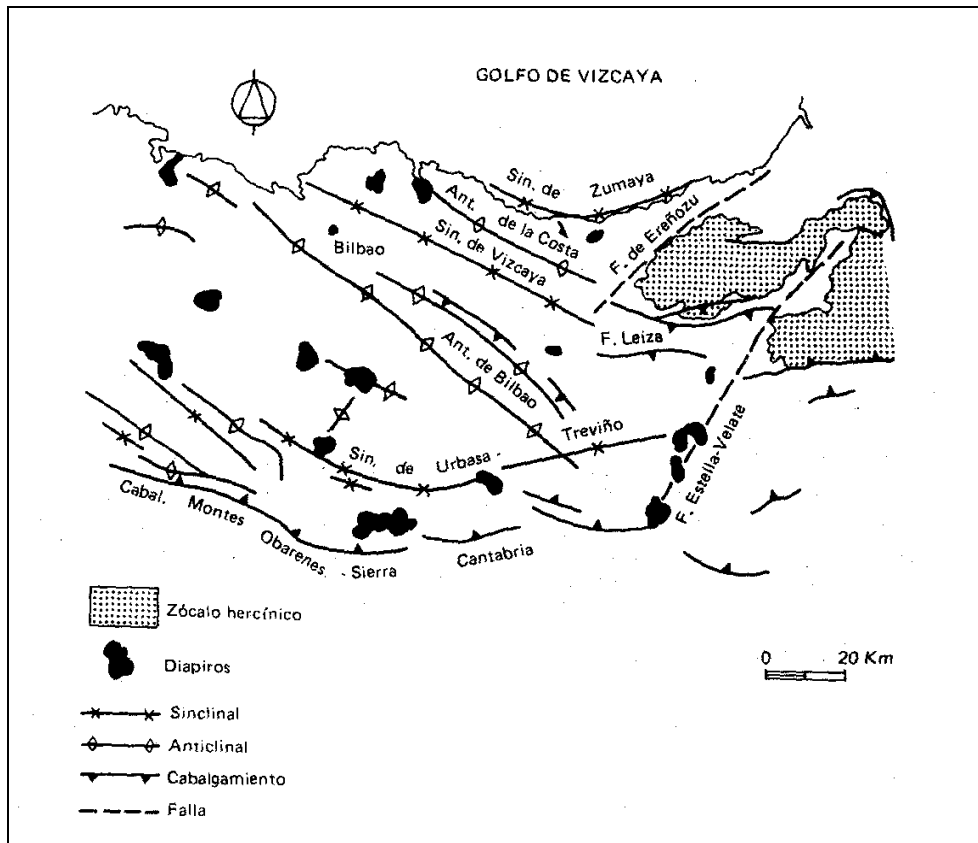


Figura 3.9: Esquema estructural del Pirineo vasco-cantábrico (ITGE, 1983).

La zona se caracteriza por presentar fuertes pendientes topográficas, y por la existencia de depósitos superficiales de distintas composiciones y espesores, lo que facilita la inestabilidad. El área presenta gran densidad de movimientos de ladera, principalmente deslizamientos superficiales traslacionales y flujos, desencadenados por frecuentes episodios de lluvia intensa. La precipitación media anual es aproximadamente de 1500 mm. El paisaje está marcado por una intensa actividad humana (reforestación, cultivos, industrias y pueblos).

### 3.3 ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA ROTURA MEDIANTE ANÁLISIS MULTIVARIANTE DE TIPO DISCRIMINANTE

#### 3.3.1. Técnicas estadísticas multivariantes: el análisis discriminante

De forma general, las técnicas estadísticas multivariantes se aplican para buscar las interrelaciones entre individuos de una población. Para cada individuo se observa, mide o se obtiene varios parámetros que lo caracterizan. Estos parámetros son llamados variables aleatorias multidimensionales. Las técnicas multivariantes pretenden explicar el comportamiento de una población a partir de la acción combinada y simultánea del conjunto de parámetros que caracterizan a los individuos que la componen.

Cuando se dispone de varias poblaciones (en el caso del análisis de susceptibilidad a los deslizamientos son dos: laderas con roturas y sin ellas, que en adelante se citan como inestables y estables respectivamente) y un solo grupo de variables, el análisis discriminante es la técnica más apropiada. La técnica permite separar de forma óptima las poblaciones mediante la adscripción de individuos u objetos (en este caso, laderas o unidades del terreno) a un grupo en función de su susceptibilidad al deslizamiento.

El procedimiento consiste en la selección de un conjunto de variables independientes que minimiza la clasificación errónea (de las laderas previamente identificadas como estables o inestables), y su contribución al proceso discriminante. Las variables seleccionadas se combinan de forma lineal para resaltar la dualidad del conjunto (población estable e inestable) de modo que se consigan los objetivos principales que persigue esta técnica: maximizar la variabilidad entre las poblaciones estable e inestable y minimizar la dispersión dentro de cada población.

Los supuestos en los que se basa el análisis discriminante para encontrar la función lineal que mejor discrimina las poblaciones son:

- independencia de las variables que, a su vez, deben ajustarse a una distribución normal por separado y en conjunto.
- Igualdad de las matrices de varianza-covarianza para cada una de las poblaciones (estable e inestable).

El incumplimiento de dichos supuestos, puede dar como resultado que el proceso de separación de las poblaciones no sea óptimo.

La función discriminante adopta la forma siguiente:

$$D = d_1V_1 + \dots + d_pV_p$$

donde  $V_i$  son las variables independientes de mayor significación estadística en el proceso discriminante;  $d_i$  son los coeficientes de clasificación estimados y  $D$  es el valor discriminante de la función.

La obtención de la función discriminante pasa por un proceso de síntesis de un espacio multidimensional en el que se encuentra distribuido el conjunto de objetos (laderas, unidades del terreno, celdas de una malla), convirtiéndolo en espacio euclidiano y definiendo un nuevo sistema de coordenadas cartesianas (factores). Este nuevo espacio trata de describir

la dispersión de la nube de puntos por medio de sus direcciones principales, las cuales tienen por función perseguir los objetivos ya mencionados de esta técnica. Una vez establecido este nuevo espacio, los individuos de cada población tienen sus coordenadas situadas sobre los ejes factoriales que definen las direcciones principales, generándose un centro de gravedad para cada población (centroide). La mayor o menor proximidad de cada uno de los individuos al centro de gravedad de las poblaciones (estable/inestable), permite su clasificación. Para mayor información sobre el análisis puede consultarse los trabajos de David et al (1977), Lebart et al (1982), Dillon y Goldstein (1986) y Cuadras (1991).

El análisis discriminante se ha utilizado para alcanzar los siguientes objetivos:

- Caracterizar las poblaciones (laderas estables e inestables) a través de variables que reflejan un comportamiento diferenciado de aquellas.
- Identificar, de entre las variables analizadas, las que mejor explican la susceptibilidad del terreno al deslizamiento superficial.
- Determinar el peso relativo de cada una de las variables.
- Definir nuevas unidades del terreno (grado de susceptibilidad al deslizamiento superficial) a partir de las características de éstas y de la aplicación de la función discriminante.

Para alcanzar dichos objetivos, se ha seguido el procedimiento utilizado por Baeza (1994), que se detalla en el siguiente apartado de Procedimiento de análisis.

### **3.3.2. Procedimiento de análisis**

El procedimiento de análisis consta de cinco etapas (Baeza, 1994) (ver figura 3.10):

1. Obtención de la muestra
2. Depuración de los datos (análisis de los errores introducidos en la muestra)
3. Selección de las variables independientes de mayor significancia estadística para construir la función discriminante
4. Definición de la función discriminante
5. Definición de los niveles de susceptibilidad y confección del mapa de susceptibilidad
6. Validación de la función y del mapa de susceptibilidad

El procedimiento detallado, descrito para la zona de la Población de Lillet se detalla en el Anejo 3. Los siguientes apartados describen la parte conceptual del procedimiento.

#### **1. Obtención de la muestra.**

El procedimiento se inicia con la selección aleatoria de una muestra de la población (celdas de la malla con presencia o ausencia de roturas). Dicha muestra debe estar formada por un número similar de individuos (celdas o unidades de terreno) de las poblaciones estable e inestable. Con esto se evita la dependencia estadística de una de las poblaciones y es condición necesaria para asegurar una óptima clasificación de los individuos, es decir, que exista una probabilidad origen y un error de clasificación igual para cada individuo de ambas poblaciones (Dillon y Goldstein, 1986).





Cada uno de los individuos de las poblaciones estable e inestable, se caracteriza por un conjunto de variables (definidas en el apartado 3.1.3.), cuya combinación permitirá establecer el grado de susceptibilidad a la rotura.

## **2. Depuración de la muestra**

Las medidas de las variables está sujeta a diversos errores. Se ha observado que se produce entre un 2% y un 5% de error en la medición y transcripción de los datos (Huber, 1981). Por este motivo, es conveniente realizar un análisis descriptivo de la muestra seleccionada (formada por un conjunto de individuos), mediante una estadística simple que describa las características de distribución de las variables asignadas a cada individuo (frecuencia, media, desviación típica, etc...), con el objetivo de identificar errores, valores anómalos o incluso la omisión de ciertos valores.

## **3. Estimación de las variables y construcción de la función**

Con la muestra depurada se inicia el proceso para la selección de las variables que definirán la función discriminante. La fase de selección consta de diferentes etapas en las que, mediante análisis estadísticos de tipo descriptivo, se identificarán aquellas variables que mejor explican la distribución espacial de los deslizamientos y su influencia en la susceptibilidad del terreno a producir roturas. Estos análisis preliminares permiten identificar y descartar variables que, por violar alguno de los supuestos básicos de la técnica discriminante, pueden afectar a la validez de los resultados finales garantizando que la función discriminante resultante del análisis, sea la óptima.

El análisis consta de las siguientes etapas:

- a) creación de variables compuestas
- b) recodificación cuantitativa de las variables cualitativas.
- c) chequeo del ajuste a una distribución normal de las variables.
- d) chequeo de variables independientes.
- e) construcción de la función discriminante.

### a) Creación de variables compuestas

Dada una muestra inicial, formada por un conjunto de variables originales o primarias, pueden definirse nuevas variables que por sus características pueden ser de interés. Dichas variables, a las que denominamos compuestas, se crean por la combinación de variables o por la aplicación de funciones de transformación simples de una variable (por ejemplo la función senoidal de la pendiente).

### b) Recodificación cuantitativa de las variables cualitativas

Las funciones discriminantes obtenidas utilizando variables cualitativas suelen dar resultados muy pobres (Dillon y Goldstein, 1986). Por este motivo, y con el objetivo de obtener un conjunto de datos homogéneos, es aconsejable la transformación cuantitativa de las variables cualitativas. La transformación a una escala métrica de las variables cualitativas, se ha realizado mediante la aplicación del “criterio experto” otorgando un valor a cada categoría. La distancia entre estos valores quiere reflejar el significado mediante el cual se ha

basado la clasificación y de este modo el comportamiento de la variable con respecto a la estabilidad de las laderas. Hay que indicar que la transformación cuantitativa de variables cualitativas no implica necesariamente una mejora sustancial en los resultados del análisis, pues aún teniendo un conjunto de datos homogéneos de tipo cuantitativo, las variables transformadas cuantitativamente no dejan de ser por ello variables discretas con dificultades de normalización y presentan dificultades para integrarse con el resto de variables en los análisis de tipo multivariante.

c) Chequeo del ajuste a una distribución normal de las variables.

Una vez se dispone del conjunto de variables (originales y compuestas) con escala métrica, se asume que las variables representan una muestra de una población cuya distribución es normal. Aún, aceptando dicha hipótesis, todas las variables deben ser sometidas a un test de verificación para determinar el grado de ajuste de la muestra a una distribución normal.

De entre los diferentes tests que analizan el ajuste a una distribución normal, se ha seleccionado el test de Kolmogorov-Smirnov (K-S). El test K-S permite conocer la bondad del ajuste mediante el contraste entre la función de distribución acumulada empírica de la variable y la distribución acumulada teórica normal. Para ello, utiliza la media y la desviación estándar de la muestra.

Las variables que no superan el nivel de significación (5%, en el estudio) adoptado en el test K-S, deben ser transformadas adecuadamente de forma que se corrija la desviación de la distribución asimétrica presentada. Este tipo de transformación suele conseguirse mediante distribuciones lognormales de un o dos parámetros tales como  $\log x$  o  $\log x + \beta$ .

Dichas transformaciones, suponen un empobrecimiento de la variable, provocando la pérdida de información en algunos casos. Asumiendo este hecho, se considera oportuno no adoptar transformación alguna cuando ésta no comporta una mejoría sustancial de la normalidad.

d) Chequeo de variables independientes.

Las variables utilizadas en el análisis discriminante no deben presentar un alto grado de dependencia, siendo necesario eliminar aquellas variables explicativas que están correlacionadas más de un 0.98 (Chadule, 1980).

El análisis factorial de componentes principales permite determinar las correlaciones entre las variables y también conocer las agrupaciones de variables con estructura semejante. Este análisis identifica las tendencias dentro de la muestra o correlaciones difíciles de obtener con una simple matriz de correlaciones.

El análisis de componentes principales describe la dispersión de una nube de puntos (valores de las variables de cada individuo) en un espacio multidimensional mediante la definición de un nuevo sistema de ejes (factores), de forma que la dispersión de los puntos (medida por la varianza muestral) sea la máxima entre todas las combinaciones posibles de las variables originales (David et al, 1977; Nie et al 1981). Los factores de mayor interés son aquellos que tienen asociada una mayor varianza.

La exploración de las variables mediante la aplicación de este análisis, se realiza como se ha comentado, para detectar posibles relaciones lineales entre las variables. Para ello, se extraen el mínimo número de factores que expliquen el máximo porcentaje de varianza total. El peso de cada variable en cada factor identificará la existencia de posibles dependencias. Cuando un factor está definido por más de una variable, con valores de saturación (peso de la variable en el factor) muy elevados, indica la existencia de dependencias lineales entre ellas. Por lo contrario, cuando un factor sólo se explica por medio de una sola variable, con valor de saturación elevado, indica un alto grado de independencia de la variable, con respecto al conjunto restante de variables.

Una vez identificadas las variables dependientes, antes de descartar alguna de ellas, es aconsejable realizar un análisis de contraste de las poblaciones (estable e inestable), con el objetivo de conocer las variables que mejor caracterizan cada población y por tanto mayor influencia tienen en la separación de estas.

El análisis de contraste de poblaciones, se realiza a partir del Test t (análisis de medias) y del test One-way (análisis múltiple de la varianza). El contraste, aunque se lleva a cabo sobre el conjunto de las variables, tiene su mayor interés en los grupos de variables altamente correlacionadas. En este último caso, se trata de determinar cuál de ellas influye en mayor medida en el comportamiento estable o inestable de la ladera, es decir, en la separación de las poblaciones. Se excluirán del análisis discriminante aquellas variables que tengan un menor nivel de significación, según el control estadístico adoptado. Cuando varias variables altamente correlacionadas presentan una significación estadística elevada, no debe de rechazarse a priori ninguna de ellas, sino que se introducen en el análisis discriminante por separado. En estos casos, lo aconsejable es realizar análisis discriminantes independientes para cada conjunto de variables, incorporándose en cada análisis una de las variables correlacionadas. De este modo se determinará el comportamiento de éstas, de forma integrada con el conjunto restante de variables.

#### e) Construcción de la función discriminante.

Los pasos anteriores han permitido seleccionar un reducido número de variables independientes y de gran significancia estadística. Asumiendo que dichas variables tienen una distribución normal multivariante con igual matriz de varianza-covarianza para cada población estable e inestable, se aplica a continuación el análisis discriminante. El objetivo es construir una función con el menor número de variables que separe las poblaciones de celdas estables e inestables.

El método utilizado para la selección de las variables en la función, es el denominado “stepwise” o método por pasos. Mediante este método las variables entran o son excluidas una a una en la función discriminante hasta que se genera la función más significativa que incluya el menor número de variables. El método stepwise selecciona las variables en base a un criterio específico determinado previamente. El criterio aplicado, es el denominado “Minresid”, por el que se minimiza la suma de la varianza no explicada (varianza residual) entre los grupos, previamente etiquetados por la variable de grupo (estable o inestable). Los controles estadísticos utilizados para la selección y orden de entrada de las variables en el análisis se realizan mediante el nivel de tolerancia (t) mínimo (0.001) y el valor mínimo de F (1.0).

Como resultado del análisis se obtiene una función combinación lineal de las variables de mayor significación estadística en la discriminación de las poblaciones previamente

definidas como estable e inestable. Los coeficientes estandarizados discriminantes dan una correlación simple de cada variable con la función discriminante. De este modo, se conoce la influencia positiva o negativa de las diferentes variables explicativas con respecto a la variable explicada (ladera estable o inestable). El valor del coeficiente de la variable en la función discriminante indica, asimismo, la contribución relativa de la misma en la ocurrencia o no del deslizamiento, de modo que se puede conocer qué variables de la función presentan mayor y menor significación.

Una vez completado el análisis, es conveniente determinar el grado de ajuste de la función mediante el contraste entre la muestra clasificada previamente según la variable de grupo (estable o inestable) y la clasificación realizada por la función discriminante. Dada una probabilidad de pertenencia del 0.5 para cada individuo (celda estable/celda inestable) de ambas poblaciones en la clasificación, y asumiendo una equivalencia en el tamaño de las poblaciones analizadas, cuanto menor sea el error de clasificación, más fiable es la función discriminante. Otros controles estadísticos que permiten estimar el grado de fiabilidad de la función discriminante son los proporcionados por los valores de los centroides de cada población, así como los valores de Lambda de Wilks. Cuanto más alejados estén los centroides uno de otro, mejor es la función discriminante, es decir mayor separación entre poblaciones. Esto se refleja mediante los valores adquiridos por cada centroide, de manera que valores idénticos o muy semejantes, pero con signo opuesto, nos indica una mayor fiabilidad de la función. La función discriminante separa las laderas con roturas observadas (inestables) de las que no presentan roturas (estables). De ello se desprende que los valores discriminantes más alejados del centroide de las laderas estables indica que se trataría de laderas inestables. En el caso que estas laderas pertenezcan a la población estable se interpreta que son las laderas más susceptibles a la rotura en un próximo evento. Para el caso del control estadístico Lambda de Wilks cuanto menor es su valor mayor es la fiabilidad de la función.

Del proceso de aplicación del análisis discriminante se pueden obtener, según los controles estadísticos establecidos a priori, distintas combinaciones de variables. La selección de la función discriminante óptima se realiza tomando como criterio la relación coste/beneficio: coste de obtención y representación de las variables de la función y beneficios aportados por la explicación del comportamiento de la población que ofrecen las variables. Cuanto menor es la relación, mejor se considera la función, garantizando una predicción practicable. Así, en los análisis realizados se selecciona la función que con la menor combinación de variables, se obtenga la mejor clasificación de la población inestable.

#### **4. Definición de los niveles de susceptibilidad / creación del mapa de susceptibilidad**

Existen diversos métodos para la definición de los niveles de susceptibilidad, todos ellos basados en los valores discriminantes de la función (Carrara, 1984; Baeza, 1994). El método utilizado aquí consiste en la división, en rangos iguales, de la distribución de frecuencia de los valores discriminantes de cada unidad de terreno.

Se genera así, un mapa en el que cada unidad de terreno, sea celda, cuenca, unidad de condición única, etc., se le adjudica un nivel de susceptibilidad (desde muy baja susceptibilidad hasta muy alta), según el valor discriminante adquirido por la función. El resultado final es una zonificación del terreno según unos niveles de susceptibilidad al deslizamiento, derivados de la función discriminante aplicada sobre cada unidad del terreno, cuyo valor dependerá de los valores de las variables que caracterizan dicha unidad.

## **5. Validación de la función discriminante y la predicción del mapa resultante**

El método utilizado para evaluar la fiabilidad de la función (contraste entre las poblaciones clasificadas a “priori” y las clasificadas por la función) se considera optimista, pues se utiliza la misma muestra de la cual deriva la función. Para evitar esto y validar correctamente la función discriminante existen diversos métodos que no requieren de la muestra original con la que se deriva la función discriminante:

- a) Método temporal que implica usar una población de deslizamientos ocurridos en un periodo determinado de tiempo para construir la función y validarla con los deslizamientos ocurridos en la misma área posteriormente (Luzi, 1995)
- b) Método espacial en donde se utiliza una zona para construir la función y validarla mediante su aplicación en otra área de iguales características geológico-geomorfológicas (Baeza, 1994). Se puede utilizar la misma área subdividiéndola en dos subáreas, una para el análisis y la otra para la validación.
- c) Método aleatorio que selecciona una muestra al azar subdividiéndola en dos submuestras, una para obtener la función discriminante y la otra para validar la función.

La técnica utilizada aquí es la de selección al azar de una submuestra de una misma área para realizar el análisis estadístico y para obtener la función, y con el resto del área – muestra restante- realizar la validación de la predicción.

Para comprobar el ajuste de la función a partir de la distribución de deslizamientos de la zona en los diferentes niveles de susceptibilidad establecidos en el mapa final, se utiliza un índice de densidad relativa (Baeza, 1994). Este índice corresponde a la relación  $((n_i/N_i)/\Sigma(n_i/N_i)) * 100$ , donde  $n_i$  es el número de roturas observadas en cada nivel de susceptibilidad y  $N_i$  es el área ocupada por cada nivel. Cuanto mayor sea el porcentaje de celdas con roturas clasificadas en los niveles de susceptibilidad más altos (susceptibilidad alta o muy alta), mejor se considera el ajuste de la función y por tanto la fiabilidad de la misma.

### **3.3.3. APLICACIÓN A LA POBLA DE LILLET**

En este apartado se discuten los resultados del análisis de susceptibilidad a los deslizamientos superficiales de la zona de La Pobla de Lillet. La descripción de los pasos del procedimiento, válido tanto para esta zona como para las áreas de Vallcebre y el Bajo Deba se pueden consultar en el Anejo 3. Los resultados se discutirán paso a paso, siguiendo el análisis estadístico, con el objetivo de tratar conjuntamente el procedimiento y los resultados del área de aplicación. En la figura 3.11 se muestra la distribución de los deslizamientos del área.

Como ya se ha comentado previamente, el análisis se lleva a cabo en formato raster, donde cada variable forma una malla regular. La resolución de estas mallas es de 15 \* 15 m y las celdas son las unidades de terreno utilizadas para el análisis. En este caso, cada celda representa un individuo dentro de la población estable o de la inestable según contenga o no una rotura de ladera. Las roturas de laderas se definieron a partir de un punto en la zona de rotura de los deslizamientos. Esta información se digitalizó y, posteriormente en el SIG se transformó a formato raster en una variable que se utiliza como variable de agrupación (celdas sin roturas –estables- y celdas con roturas observadas –inestables-). En la Pobla de Lillet se ha utilizado el modelo digital de elevaciones relleno (corregido) para derivar el resto



de modelos del terreno (variables). En adelante a la variable MDEFILL se la nombrará como MDE.

### **Ajuste y ponderación de variables**

Por **ajuste** se entiende aquí aquellos pequeños retoques realizados en algunas variables a fin de evitar que algunas celdas queden sin valor, en una posterior transformación de la variable, así como la transformación de alguna variable de tipo circular a una variable lineal (caso de ORIENT).

Las variables que precisan de este tipo de ajuste son las que no observan una distribución normal como, por ejemplo, ACUENCA, LONG, AFS, y LFS. Son variables que siempre tendrán sesgo positivo muy marcado debido a que muestran la acumulación de flujo (bien sea como área, bien como longitud). Para poder trabajar con ellas e incorporarlas al análisis discriminante tendrán que ser transformadas a logaritmo decimal para reducir el sesgo y conseguir una distribución más normal. Al aplicar el logaritmo, las celdas con valor igual a 0 quedarán sin valor (celdas conocidas como NODATA en terminología de ARC/INFO) en la malla regular transformada, perdiendo la información. Estas celdas tienen una área o longitud de cuenca acumulada = 0. Para evitar perder estos valores se ha sumado una constante a toda la malla regular de manera que al hacer la transformación a log10 no queden celdas sin valor y que éstos sean positivos. Así se ha sumado el valor 1,1 a todas las celdas de la malla regular de cada variable. Como se trata de áreas mínimas de 225 m<sup>2</sup> (en el caso de ACUENCA y AFS) o de longitudes mínimas de 15 m (para las variables LONG y LFS), el resultado final apenas se ve alterado. Otra opción es modificar sólo aquellas celdas con valor = 0 y darles el valor 1,1 aunque esta última opción requiere más pasos para llegar a un resultado similar en cuanto a significancia estadística para el análisis de la estabilidad. El procedimiento de ajuste se describe en el Anejo 3.

La variable ORIENT, que es la orientación de la ladera, se ha transformado de 0 - 360 a 0 -180 para evitar tener que trabajar con estadística circular. La transformación realizada en el área de la Pobla anula los valores Este-Oeste describiendo las orientaciones Norte-Sur (valor 0 para en Norte y 180 para el Sur), que son las que predominan en el área, puesto que los valles son Este-Oeste (valor 90 en la transformación). La variable se transforma con un archivo AML mostrado en el Anejo 1.

Otro retoque que puede realizarse ajusta la variable RUGOS reduciendo el efecto “borde” que sufre esta variable por la forma como se genera. Este efecto produce valores muy bajos en los bordes de la malla regular que quitan resolución al conjunto. El ajuste se realiza cambiando el valor de estas celdas por un valor medio del conjunto de la malla regular más alto. La omisión de este ajuste no altera los resultados del análisis de susceptibilidad.

La **ponderación** se ha realizado en las variables cualitativas (las no derivadas del MDE). Ésta siempre se realiza basándose en algún criterio interpretativo que tiene en cuenta la relación de la variable y sus categorías con la estabilidad del terreno. En las siguientes líneas se presentan las ponderaciones y su interpretación o significancia respecto a la estabilidad.

Variable VEGET: La variable densidad de vegetación/uso del suelo se ha ponderado con valores arbitrarios que reflejan el grado de permeabilidad del terreno y la acción fijadora de la cobertera vegetal. Los valores aumentan indicando que se favorece la infiltración y la

fijación del terreno (*Baeza, 1994*). No se ha tenido en cuenta la infiltración de agua a través de discontinuidades y fracturas del macizo rocoso en la categoría sin vegetación (sustrato).

SIGNIFICADO	PONDERACION
Sin vegetación	1
Prado natural	6
Prado antrópico, terrazas, cultivos	12
Bosque denso	15
Bosque abierto	12
Bosque bajo, matorral	9
Ríos, cicatrices, minas	1
Núcleos urbanos	0 (NO ENTRA EN EL ANÁLISIS)

Variable GROSOR : El espesor es determinante para la eficacia de las raíces en la fijación del terreno y para la presencia de agua. En la Población de Lillet las raíces de los árboles son someras y la acción fijadora es poco eficaz a partir de grosores de 0,5 m. Los grosores de formación superficial elevados favorecen también la presencia de agua y su efecto inestabilizador. Así pues, a mayor grosor mayor es la posibilidad de rotura.

CODIGO	PONDERACIÓN
Roca (sin formación superficial)	1
0-0.5 m de grosor de formación superficial	2
> 0.5 m de grosor de la formación superficial	4

### Obtención de la muestra utilizada para el análisis

Para realizar el análisis estadístico se ha obtenido una muestra al azar de la mitad de la población inestable (celdas con roturas) y una muestra similar en número, seleccionada también al azar, de celdas sin roturas (población estable) (véase figura 3.12). El resto de celdas inestables así como de las estables servirán para realizar la validación de la función. El procedimiento se detalla en el Anejo 3.

### Test de Normalidad de las variables

Para verificar la hipótesis de normalidad de las variables se realizan los histogramas de éstas y el Test de Kolmogorov-Smirnov. Debido a la obtención automática de la mayor parte de las variables, éstas presentarán, una distribución característica, independientemente de la zona de estudio que se esté trabajando. De las 13 variables derivadas del MDE, diez presentarán una distribución característica que podemos reunir en 5 grupos diferentes (véanse las figuras 3.13, 3.14, 3.15 y 3.16).

El primer grupo lo constituyen las variables ACUENCA, LONG, AFS y LFS (ver histogramas de las variables). Estas variables presentan un sesgo positivo muy acentuado debido a lo que representan todas ellas: acumulación de flujo. En el caso de ACUENCA y AFS se trata de acumulación de superficie de cuenca vertiente y de superficie de cuenca vertiente con formación superficial respectivamente, mientras que para LONG y LFS se trata

- LA POBLA DE LILLET (Barcelona) -

# INVENTARIO DE MOVIMIENTOS SUPERFICIALES



MAPA 15 - 15

BASE CARTOGRAFICA DIGITAL 1:5.000 DEL ICC

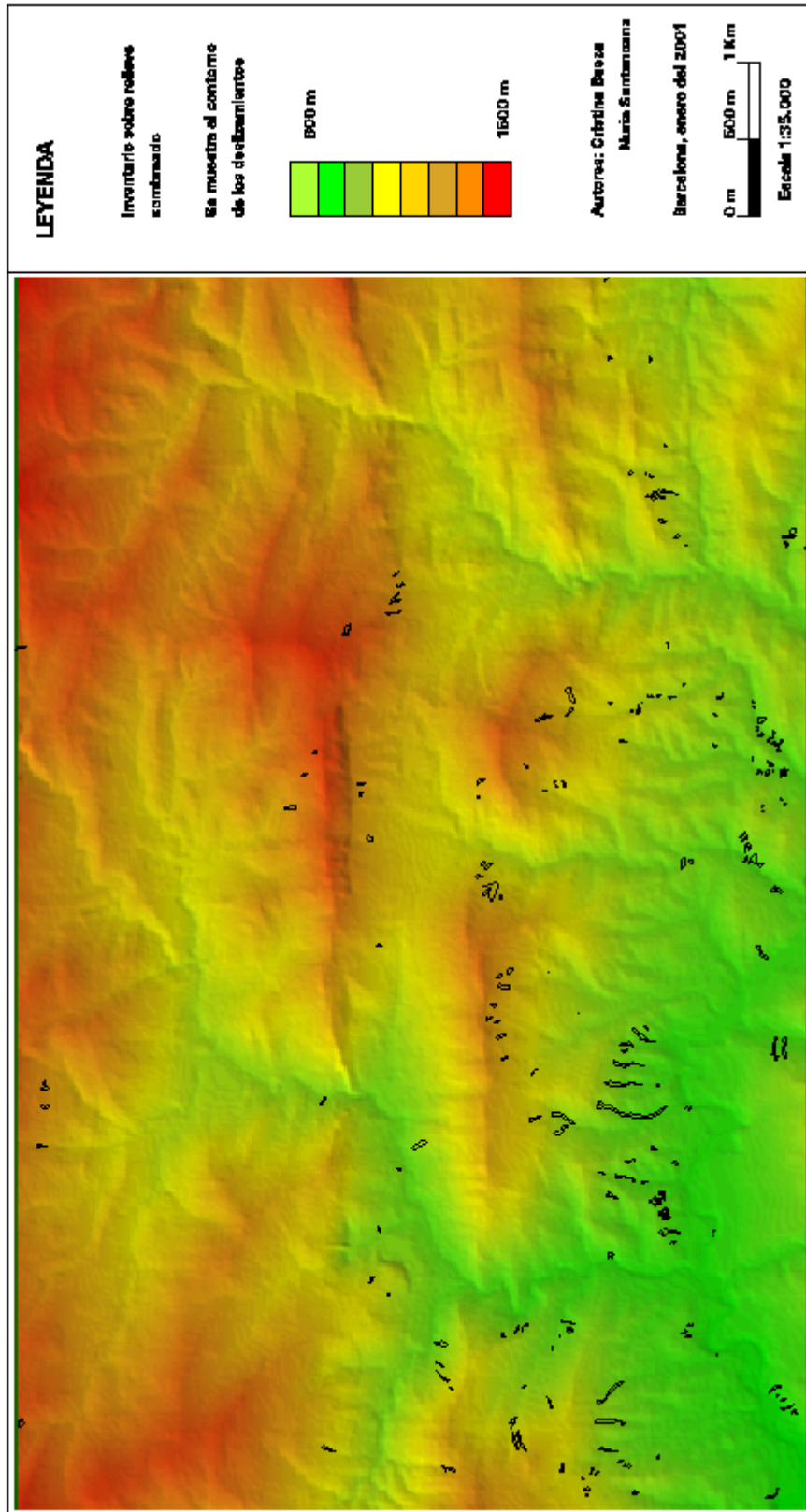


Figura 3.11: Mapa con el inventario de los deslizamientos superficiales de la Pobla de Lillet.

—LA POBLA DE LILLET (Barcelona)—

## MUESTRA ALEATORIA UTILIZADA

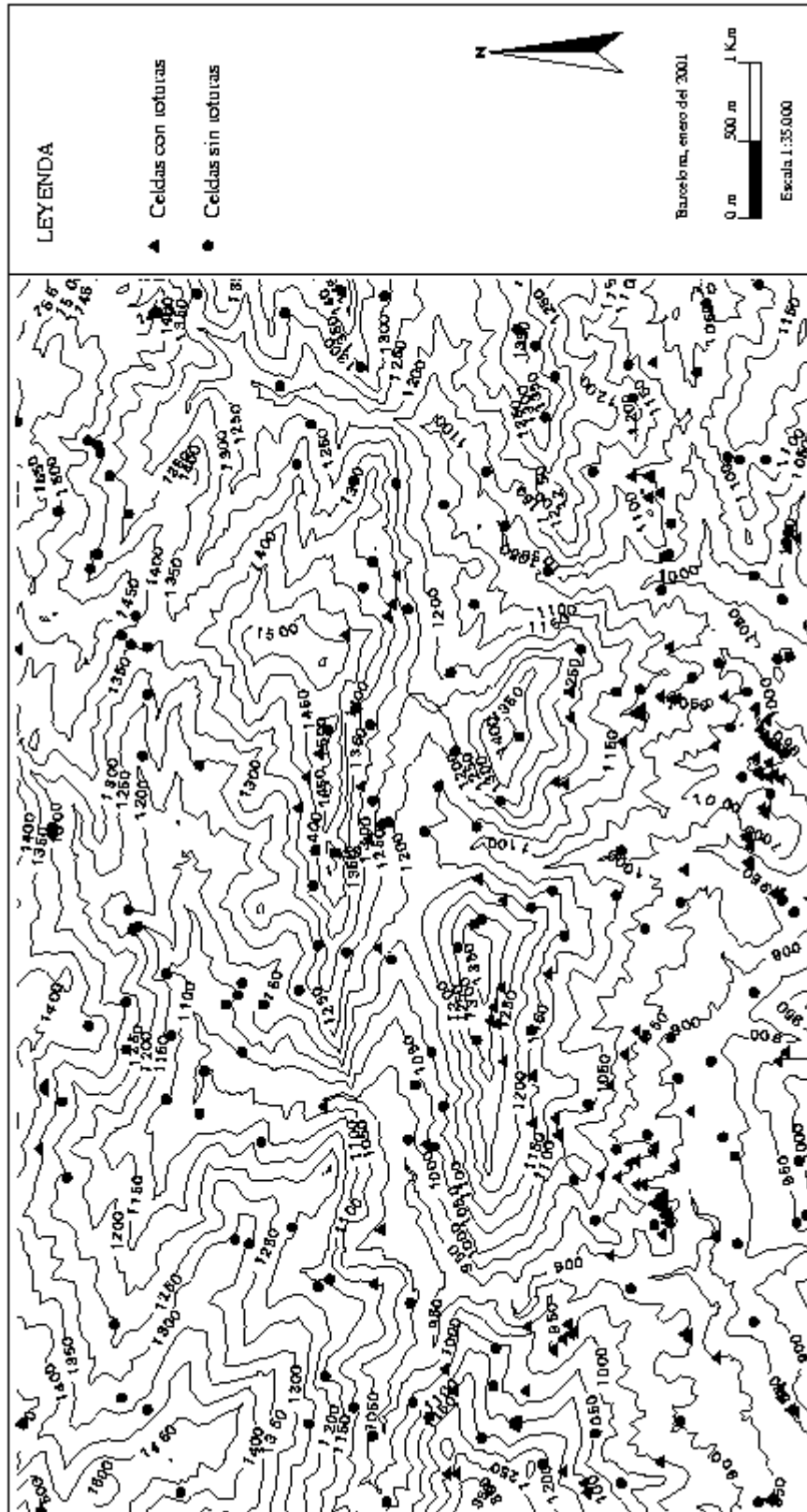


Figura 3.12: Mapa del area de la Pobla de Lillet con la muestra aleatoria seleccionada utilizada en el analisis.

de la longitud no proyectada de cuenca acumulada. La mayoría de celdas muestran poca acumulación de flujo, en términos tanto de área como de longitud. Esto se debe a que muchas de ellas se encuentran en zonas correspondientes a cabeceras de barrancos, arroyos y ríos, mientras que unas pocas celdas muestran una gran acumulación de flujo proveniente otras celdas. Éstas pertenecen a valles principales, confluencias con ríos de los que son afluentes o, simplemente, la zona más baja del río principal del área de estudio de la que se tiene un Modelo Digital de Elevaciones. Es importante, entonces, tener presente que aunque se estudie una zona pequeña con una única cuenca de drenaje, como si se tratara de una zona grande con una gran cuenca o varias cuencas de distinto tamaño, estas 4 variables **siempre** presentarán sesgo positivo marcado en su distribución, independientemente de si tratamos todo el área de estudio o si cogemos una muestra de una zona en concreto o una muestra obtenida aleatoriamente.

El segundo grupo lo constituyen las variables CURVAR, PERFIL y PLA que representan la curvatura del terreno en términos de convexidad, concavidad y zonas planas. Estas tres variables automáticas son generadas por la misma función del programa GRID de ARC/INFO y presentan una distribución cercana a la normal y cerrada a los valores centrales. Ello es debido al rango de valores que pueden tener, que oscila de negativo para celdas cóncavas a positivo para las convexas pasando por el 0 para zonas planas. El valor de las variables aumenta cuánto más marcado sea el comportamiento convexo o cóncavo de las celdas vecinas respecto de la central, que es la celda que tomará el valor de la variable. Esto favorece que unas pocas celdas tengan valores más extremos y que la mayor parte de las celdas tengan valores cercanos a 0, positivos o negativos. Podemos deducir que estas variables **siempre** presentarán esta distribución con tendencia a los valores centrales independientemente de la muestra escogida y del área de estudio, a excepción de aquellas áreas como deltas, o áreas de valles bajos y anchos de terreno llano, donde predominará el valor 0, aunque la distribución será parecida pero más marcada, o con un pico en el término central. Esto no implica que estas variables no puedan presentar una distribución un poco sesgada.

El tercer grupo está formado únicamente por la variable RUGOS con un sesgo negativo muy marcado y difícil de suavizar debido al propio algoritmo de obtención de la variable. El algoritmo normaliza los valores finales de la variable de forma que valores cercanos a 1 representan rugosidad nula disminuyendo hacia el valor 0 para rugosidad alta. Los valores reales normalmente están por encima del .6 o .7 concentrándose cerca del valor 1. Como en los otros grupos de variables ya comentados, independientemente de la muestra escogida y del área de estudio la variable RUGOS tendrá esta distribución, incluso en áreas de estudio llanas, puesto que siempre se encontrarán valores inferiores a 1 que le conferirán el sesgo negativo, aún más marcado si cabe.

Finalmente el cuarto grupo está formado inicialmente por la variable PENDM, con una distribución bimodal. Esta variable representa la pendiente media de la cuenca y en su obtención (la variable deriva del MDE) se utilizan dos conceptos: flujo acumulado y pendiente media de este flujo. En este caso el flujo acumulado sólo servirá, en términos de longitud para acotar la distancia necesaria para obtener la pendiente media. Por tanto las distribuciones típicas de variables como ACUENCA, LONG, etc. no las encontraremos aquí, ni tampoco la distribución de la variable PEND. Las celdas con valor 0 son aquellas con flujo acumulado mínimo que no permite que exista un valor de pendiente superior a 0. Se trata entonces de las celdas pertenecientes a divisorias de aguas, líneas de crestas y lomas. Tanto en áreas montañosas como en áreas llanas muchas celdas tendrán este valor de  $PENDM = 0$

con lo que el pico en la distribución de la variable **siempre** lo encontraremos independientemente de la muestra escogida y del área de estudio. Aunque inicialmente a este grupo sólo situemos a la variable PENDM, en el paso siguiente del análisis las variables transformadas a logaritmo ACUENCA, LONG, AFS, LFS tendrán una distribución similar con un pico en los valores 0 de las variables. Esto es debido al hecho que al transformar las variables se ajustan más los valores a una distribución normal separándose y mostrándose claramente, en este caso, los valores igual a 0. Estos valores en ACUENCA, LONG, AFS y LFS representan celdas con flujo acumulado igual a 0, representando cabeceras de cuencas.

El último grupo está representado por las variables PENDS y INSOL que presentan una distribución con tendencia a un sesgo negativo, no comparable a la distribución de la variable RUGOS. Esta distribución, en general parece también ser independiente del área de estudio si se tiene en cuenta la forma de obtención de las variables. La variable PENDS al ser transformada de la variable PEND, tenderá a tener sesgo negativo. Por su parte, la variable INSOL, cuyos valores pueden oscilar entre 0 y 255, es una media extraída de 15 modelos de insolación de la zona. Los valores bajos indican sombra y los altos máxima insolación. Debido a que la variable es el resultado de una media nunca llegará a tener valores de 200 o 255 ni los valores más bajos de 0 a 30. Por el contrario los valores que van a estar más presentes son los valores medios entre 130 y 180. Por lo tanto, la distribución de la variable concentrará la mayor parte de los casos en los valores intermedios dejando una cola de casos para los valores más bajos.

Las variables ORIENT, MDE y PEND variarán sus distribuciones según el relieve de la zona de estudio aunque, en general, presentarán distribuciones cercanas a la normal. En el caso de PEND en cualquier zona de estudio predominarán los valores medios de la variable exceptuando zonas llanas o aterrazadas donde dominan los valores bajos y zonas de relieves montañosos con muchos acantilados donde dominarán los valores medios y altos. Cabe tener en cuenta que la variable PEND al ser una media con las celdas vecinas, según el modelo digital disponible, su resolución y el relieve de la zona de estudio no se llegarán nunca a valores muy altos de pendiente (mayores de 80°). Para el caso de la variable ORIENT el rango de orientaciones de una zona dependerá, en el caso de zonas de montaña, en la orientación del de los valles principales, pudiendo variar la distribución de ORIENT. En la Pobl de Lillet la distribución de esta variable tiende a ser bimodal con un pico en los valores altos (cerca de 180) insinuando el predominio de orientaciones sur frente las orientaciones hacia el Norte. La variable MDE presenta un sesgo positivo con distintos picos de frecuencia a distintas altitudes. Esta distribución refleja lo que se observa en el campo con una zona de altitudes máximas (pertenecientes a la Serra del Moixeró) y zonas de distintas altitudes según sean los valles fluviales o las crestas de las distintas sierras orientadas Este-Oeste.

Las variables categóricas VEGET y GROSOR presentan una distribución alejada de la distribución normal debido a la propia naturaleza de las variables y al reducido número de categorías de que están compuestas.

La tabla 3.2 muestra los resultados para las variables, observándose los valores altos del test (distribución alejada de la normal) de las variables ACUENCA, LONG, AFS, LFS y RUGOS.

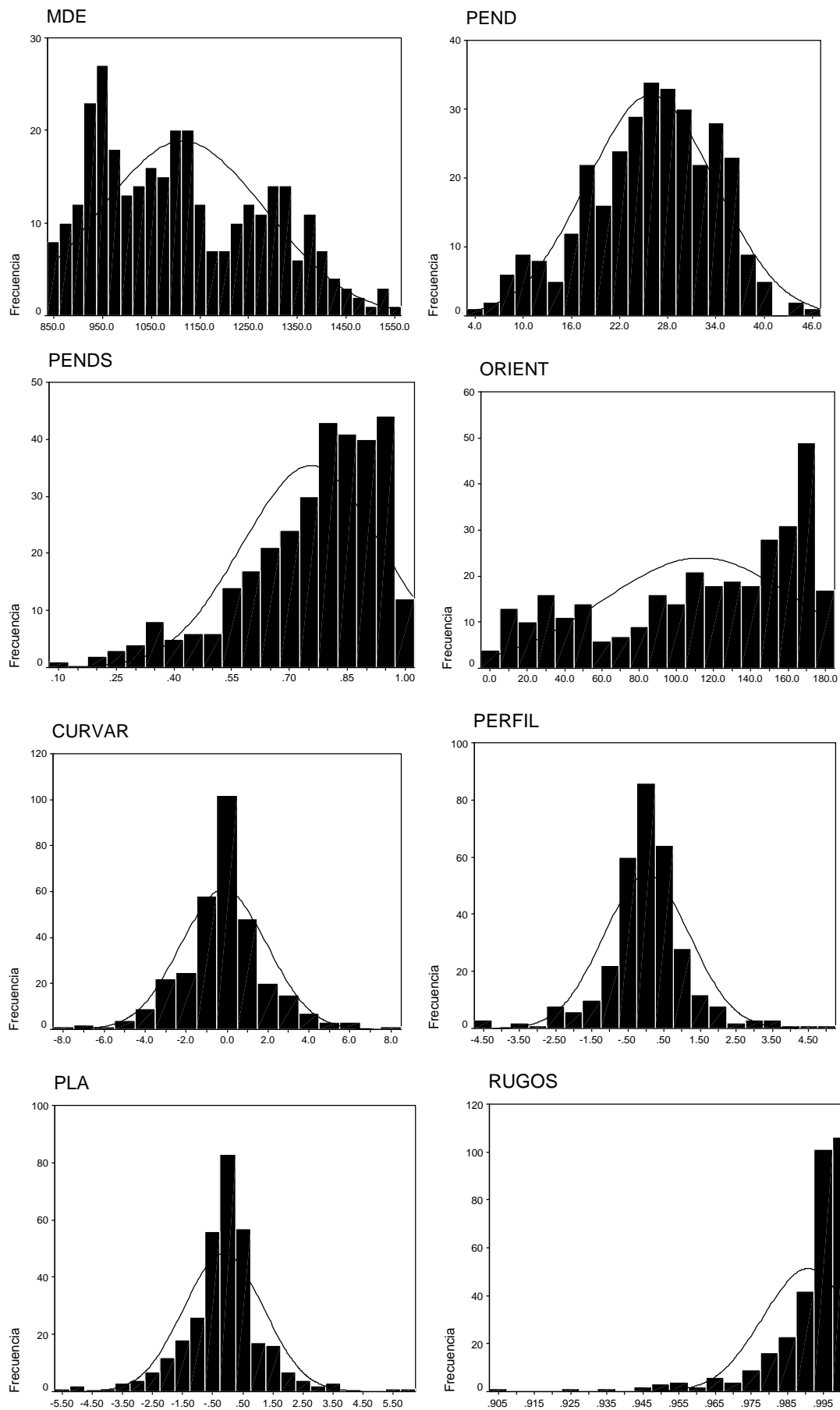


Figura 3.13 Histogramas de frecuencia con la curva normal de algunas de las variables derivadas del MDE de la Población de Lillet.

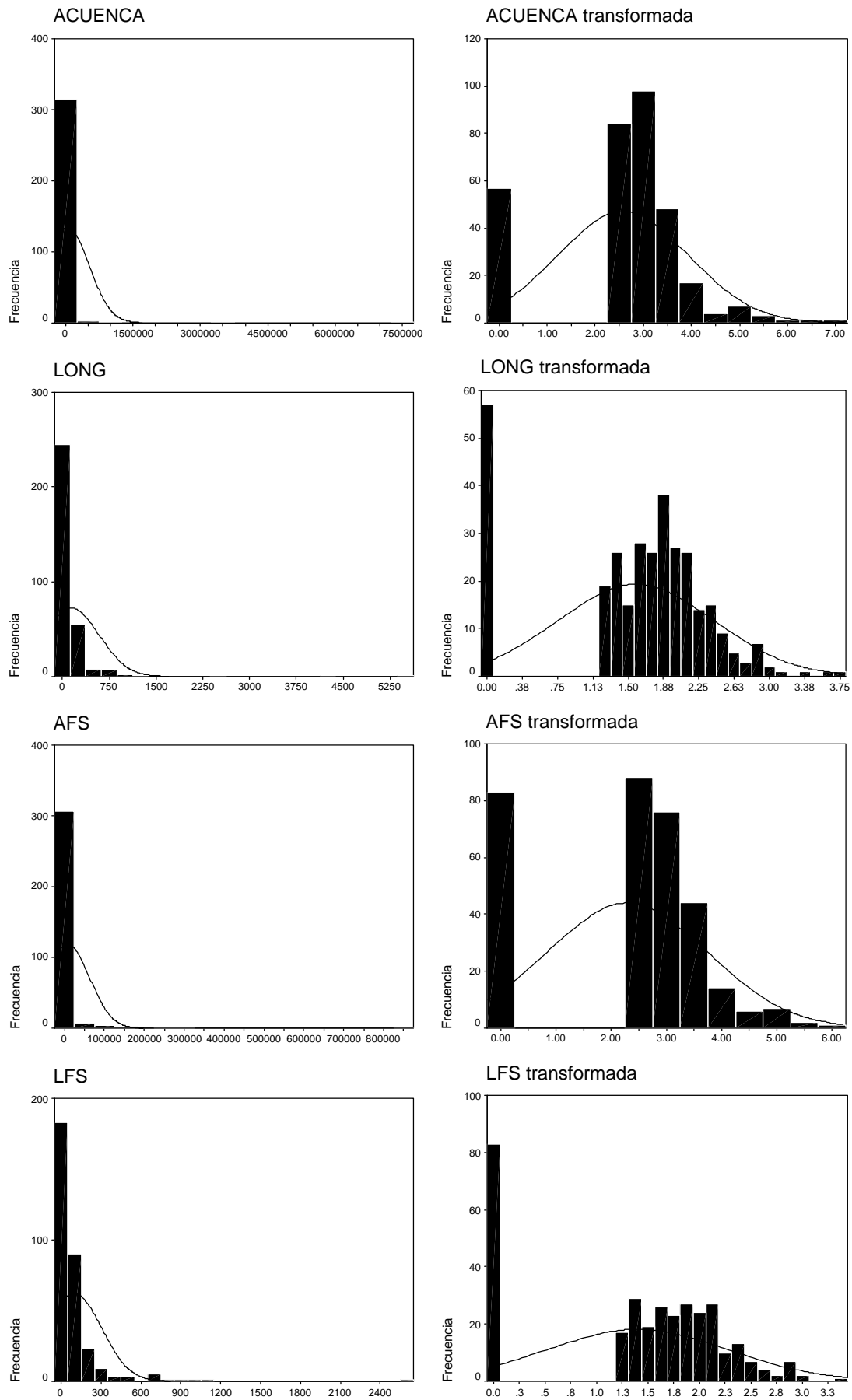


Figura 3.14: Histogramas de frecuencia con curva normal de las variables relacionadas con la cuenca de la Pobl. de Lillet y sus transformadas (logaritmo decimal).



Variables	Sin transformación		Con transformación (log <sub>10</sub> )	
	Z de K-S	Sig. asintótica	Z de K-S	Sig. Asintótica
MDE	1.473	0.026		
PEND	0.805	0.535		
PENDS	1.973	0.001		
ORIENT	2.158	0.000		
INSOL	2.340	0.000		
RUGOS	4.112	0.000		
CURVAR	1.802	0.003		
PERFIL	1.938	0.001		
PLA	1.807	0.003		
ACUENCA	8.474	0.000	4.601	0.000
LONG	6.655	0.000	2.761	0.000
AFS	7.840	0.000	4.632	0.000
LFS	5.682	0.000	3.522	0.000
PENDM	2.659	0.000		

Tabla 3.2: Resultados del Test de normalidad (K-S Z) de las variables tanto sin transformar como de las transformadas y su significancia.

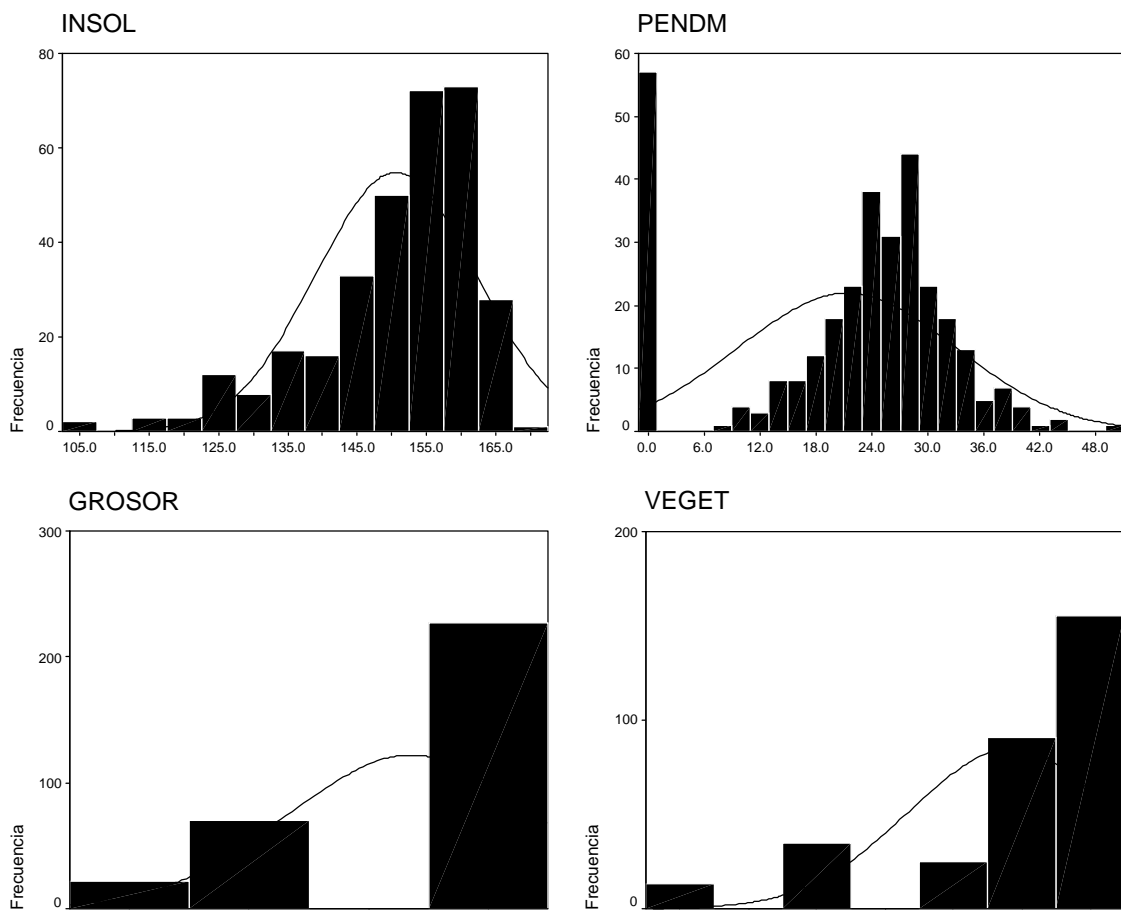


Figura 3.15: Histogramas de frecuencia con curva normal de las variables derivadas INSOL y PENDM y de las variables categóricas de la Poble de Lillet.

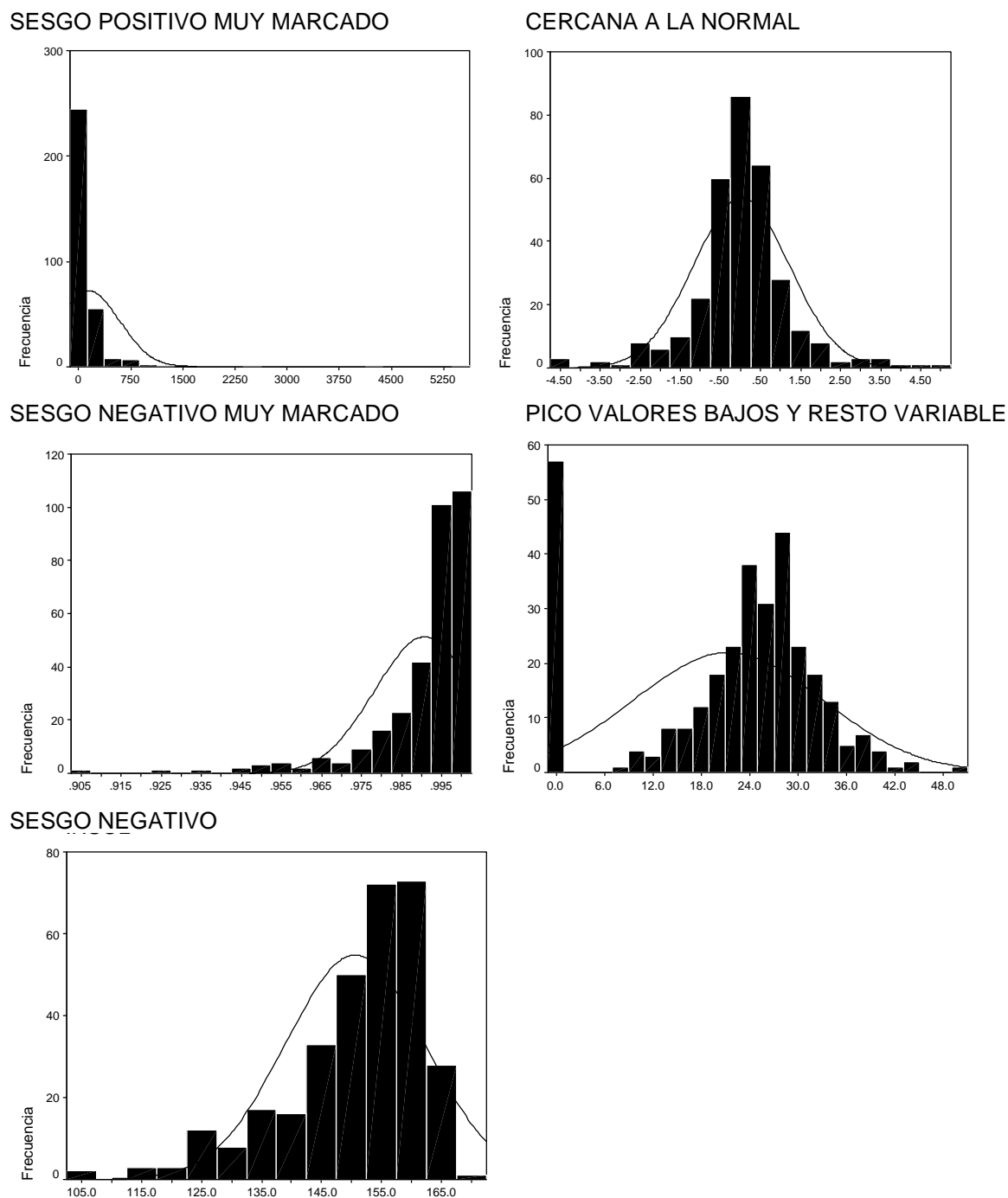


Figura 3.16: Resumen de los distintos tipos de distribuciones que siempre se encuentran de las variables derivadas del MDE y de sus transformadas utilizadas en el procedimiento expuesto en la presente memoria. Estas distribuciones y las variables que las presentan son:

- Sesgo positivo muy marcado: ACUENCA, LONG, AFS y LFS
- Distribución cercana a la normal centrada en valores centrales: CURVAR, PERFIL y PLA
- Sesgo negativo muy acentuado: RUGOS
- Pico en valores bajos y el resto variable (normal o con sesgo positivo): PENDM y las variables transformadas a logaritmo de ACUENCA, LONG, AFS y LFS
- Sesgo negativo: INSOL y PENDS

## **Transformación de variables**

Las variables con sesgo positivo (ACUENCA, LONG, AFS, y LFS) y con sesgo negativo marcado (RUGOS) se transforman en este paso para reducir el sesgo y tender a una distribución normal. Una vez transformadas se realizan los histogramas de las variables transformadas y el Test K-S (véase figura 3.14 y tabla 3.2). Esto nos permitirá ver si se ha mejorado con la transformación de la variable. Si no se ha obtenido mejora será necesario decidir sobre la utilización de la variable original o la transformada.

### Transformación de variables con sesgo positivo

Las variables se pueden transformar a un modelo de distribución lognormal compuesta por uno ( $\lg y$ ) o dos ( $\lg(y + \beta)$ ) componentes (*Baeza, 1994*). Debido a la poca diferencia entre las dos opciones se ha preferido utilizar la distribución lognormal de un componente. Ello se realiza asignando a la variable el valor de su logaritmo decimal, realizando esta transformación en las variables ACUENCA, LONG, AFS y LFS.

Al transformar las variables, su nueva distribución presenta un pico en el valor igual a 0, situación que limita el ajuste de estas variables a una distribución normal. Como se observa con los valores de K-S comparando la tabla 3.2, las cuatro variables han mejorado la distribución respecto a la inicial aunque no llegan a tener una distribución normal.

### Transformación de variables con sesgo negativo

Para reducir el sesgo negativo, en el caso de la variable RUGOS, se puede asignar a la variable el valor de su cuadrado o cubo. Debido a que las transformaciones no representan ninguna mejoría, en cuanto a la distribución de la variable se refiere se ha decidido trabajar directamente con la variable hasta conocer su valor discriminante.

## **Análisis Factorial de Componentes Principales**

Una vez se ha comprobado la normalidad de las variables, el siguiente paso es verificar la independencia de las variables entre ellas mediante el Análisis Factorial de Componentes Principales (véase Anejo 3). Los resultados obtenidos con la muestra de La Población de Lillet, aunque concretos de esta zona del Prepirineo, se pueden utilizar para comentar tendencias generales que se pueden observar en las variables, sea cual sea la zona de estudio.

El análisis factorial se ha aplicado sobre 16 variables de las cuales 2 son cualitativas. La bondad de los resultados obtenidos se ve limitada por la varianza total explicada, donde los tres primeros factores representan el 63.16% del total de la varianza, alcanzando un 80.3 % cuando se consideran los 5 factores resultantes (ver tabla 3.3). De los resultados observados en la tabla 3.4 se desprende que la varianza total de cada una de las variables explicadas por los 5 factores (communality) supera el 40 % (con la variable RUGOS) siendo las variables PEND, PENDS y CURVAR las mejor representadas con más de un 95% de la varianza, seguidas por las variables ACUENCA, LONG, AFS y LFS con más de un 91 %. Los factores se observan en la tabla 3.5 donde se incluye el peso de cada una de las variables con valor por encima de 0.4.

FACTOR	EIGENVALUE	% DE LA VARIANZA	% ACUMULADO
1	4.433	27.704	27.704
2	2.766	17.289	44.993
3	2.366	14.788	59.781
4	1.701	10.633	70.414
5	1.592	9.953	80.367

Tabla 3.3: Varianza total explicada del Análisis Factorial de Componentes Principales (factores). Resultados de las sumas de las saturaciones al cuadrado de la rotación.

El **primer factor** que explica el 27.7 % de la varianza total de la muestra, está representado por las variables ACUENCA, LONG, AFS, LFS y PENDM todas ellas referidas a la cuenca acumulada. Este factor expresa la capacidad de converger mayor o menor cantidad de agua hacia la zona potencial de rotura. En la tabla 3.6 se observan las altas correlaciones entre las variables representadas por el factor (excepto la variable PENDM).

El **segundo factor** que explica un 17.2% de la varianza total está representado por las variables referidas a la pendiente de la ladera y por la insolación (PEND, PENDS y INSOL). Este factor trata de expresar la influencia de la ladera y su orientación respecto al sol en la ocurrencia de deslizamientos. En el caso que no se utilizara la variable PENDS que es la función senoidal de PEND, seguramente este factor no estaría representado por estas variables si no que serían las variables del tercer factor las que estarían aquí. En la tabla 3.6 se observa la alta correlación entre PEND y PENDS siendo la correlación con la variable INSOL de 0.69.

VARIABLES	COMUNALIDADES	VARIABLES	COMUNALIDADES
MDE	0.661	INSOL	0.867
PEND	0.973	PENDM	0.848
PENDS	0.955	GROSOR	0.797
ORIENT	0.785	VEGET	0.526
CURVAR	0.950	ACUENCA	0.922
PERFIL	0.721	LONG	0.927
PLA	0.696	AFS	0.911
RUGOS	0.408	LFS	0.913

Tabla 3.4: Comunalidades o varianza total de cada una de las variables.

El **tercer factor** que explica un 14.7 % de la varianza total está representado por las variables referidas a la curvatura de la ladera (CURVAR, PERFIL y PLA). El factor recoge parte de la morfología de la ladera a través del grado de convexidad o concavidad de la misma en diversas secciones. Como se observa en la matriz de correlaciones (tabla 3.6) y en la tabla 6 las tres variables muestran un coeficiente de correlación superior a 0.8, con la excepción de las variables PERFIL y PLA debido a que explican cosas distintas (curvatura en la dirección paralela y transversal a la máxima pendiente respectivamente). También encontramos la variable RUGOS, con un peso muy bajo, variable que explica la morfología del relieve.

El **cuarto factor** con un 10.6% de la varianza total está representado por la elevación y el espesor de la formación superficial (GROSOR y MDE). En la matriz de correlaciones se observa que no existe correlación entre estas variables aunque presentan los coeficientes de correlación más elevados de las dos variables en relación a las otras (coeficiente de 0.53 entre ellas). Se podría interpretar como la litología del área debido a que la variable GROSOR



está muy relacionada con la litología y, a su vez, la altitud en la zona de La Población también está relacionada con ella. Hemos observado que, a altitudes elevadas la litología presente no favorece la formación de un depósito superficial susceptible de presentar roturas, mientras que a bajas altitudes la litología favorece la aparición de formación superficial. Esto refleja una tendencia inversa a la distribución de la intensidad de la lluvia en el área.

El **quinto factor** con un 9.9 % de la varianza total está representado por las variables orientación, vegetación e insolación (ORIENT, VEGET y INSOL). En la matriz de correlaciones se observa que no existe correlación entre estas variables (coeficiente de 0.59 entre INSOL y ORIENT). El factor expresa la influencia de la orientación de la ladera en la formación del tipo y densidad de la cobertura vegetal así como a las horas de sol a la que está expuesta. Laderas orientadas al Sur tienen más vegetación de prado y bosque bajo que las laderas orientadas al Norte con más bosque denso.

Con la experiencia previa en este tipo de procedimiento y en estas variables podemos asegurar que las altas correlaciones entre las variables ACUENCA, LONG, AFS y LFS se van a dar siempre, al igual que entre CURVAR, PLA y PERFIL. Ello conducirá a la aparición de 2 ejes representados siempre por estas variables en el Análisis Factorial. La figura 3.17 muestra el gráfico de componentes (factores) en el espacio rotado en proyección tridimensional.

<b>MATRIZ DE COMPONENTES ROTADOS (Rotación Varimax)</b>					
Variables	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5
MDE				-0.782	
PEND		0.981			
PENDS		0.969			
ORIENT					0.860
INSOL		-0.738			0.548
RUGOS			0.476		
CURVAR			0.888		
PERFIL			-0.822		
PLA	-0.468		0.677		
ACUENCA	0.910				
LONG	0.931				
AFS	0.905				
LFS	0.914				
PENDM	0.764	0.477			
VEGET					-0.677
GROSOR				0.864	

Tabla 3.5: Matriz con los pesos de las variables para cada uno de los 5 factores resultantes del Análisis Factorial con los valores mayores de 0.4. El método de rotación es la normalización Varimax con Kaiser. La rotación ha convergido en 7 iteraciones.

### **Relación entre las variables y la inestabilidad. Test –T y ONEWAY**

Con los resultados de las dependencias entre variables descritas en el Análisis Factorial se realiza los dos siguientes pasos contrastando las poblaciones estables e inestables de la variable de agrupación para cada variable de la muestra (ver Anejo 3). Primero se realiza el Test-T de comparación de medias y varianzas y luego el Test Oneway

de varianzas múltiples. Los resultados de estos tests no se pueden generalizar, dependiendo de la zona de estudio, de la muestra y de la distribución de los deslizamientos superficiales. Como se comprobará con estos tests existen algunas variables con muy poco poder discriminante entre las poblaciones estable e inestable.

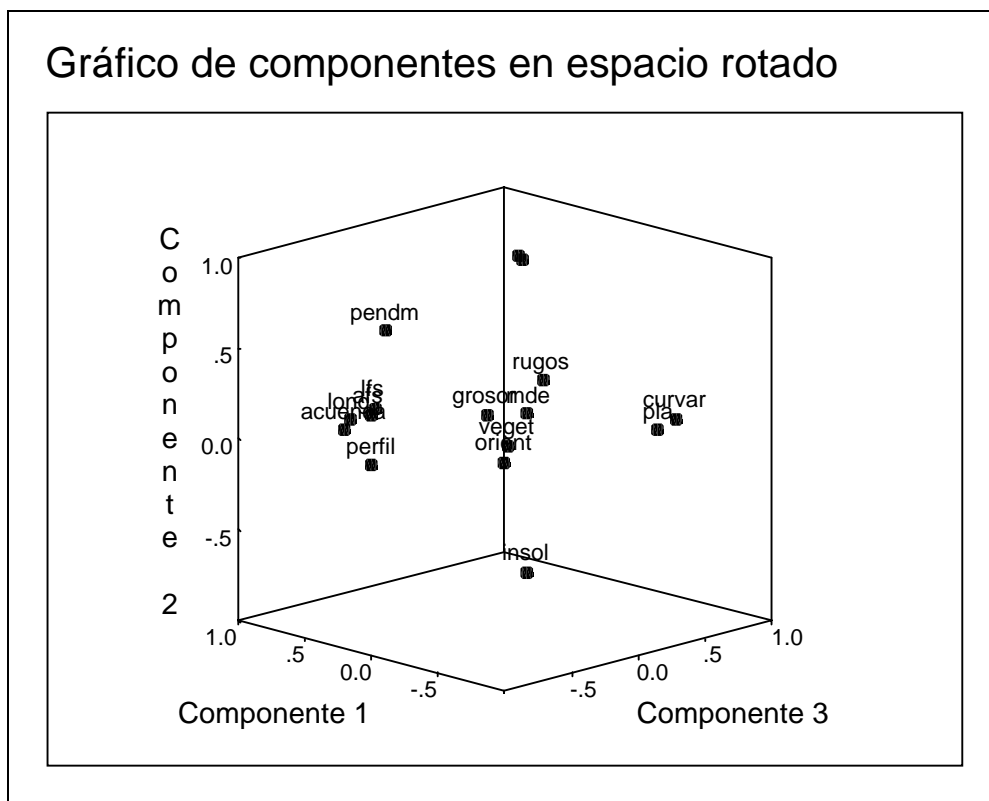


Figura 3.17: Proyección de las variables en un espacio tridimensional formado por los tres primeros factores del Análisis Factorial de Componentes Principales de la zona de la Población de Lillet. En la parte superior del gráfico (cerca del eje o componente 2) los dos marcadores pertenecen a las variables PEND y PENS.

Con los resultados del Test-T (ver tabla 3.7) podemos observar como las variables PERFIL, RUGOS, VEGET, INSOL y ORIENT presentan medias y varianzas muy similares entre las dos poblaciones, teniendo en cuenta el rango de valores que tiene cada una. Entre ellas, PERFIL y RUGOS son las peor situadas.

Los resultados del test ONEWAY (ver Tabla 3.7) permiten observar que las variables PERFIL y RUGOS tienen nulo poder discriminante, aunque la siguiente con bajo valor es la variable VEG. Cabe destacar el alto poder discriminante de la variable categórica GROSOR seguida por las variables MDE, PENS y PEND.

Los resultados de la variable PERFIL indican que el efecto de concentración de las aguas en la dirección de máxima pendiente no es un factor importante en la formación de deslizamientos superficiales (según la muestra de la que se dispone), aunque por el contrario, la concentración de flujo en los perfiles transversales (variable PLA) tiene influencia sobre la estabilidad. La rugosidad del terreno, definida como la tenemos aquí, no es un factor importante. Parece también que la variable cualitativa VEGET no tiene mucho poder discriminante, comparada con otras variables, a pesar de las expectativas iniciales con las que se recogió la información sobre esta variable y con la idea a priori que se tiene sobre su

importante papel en la estabilidad del suelo. Ello, como se verá más adelante, es debido, en parte, a la ponderación atribuida a la variable.

T-TEST			ONE-WAY		T-TEST			ONE-WAY	
Variable (grupo)	Media	Desviación estándar	F	Sig.	Variable (grupo)	Media	Desviación estándar	F	Sig.
MDE	ST	1165.9	40.5	0.000	PLA	ST	0.08	11	0.001
	IN	1051.5				IN	-0.39		
PEND	ST	23.8	27.8	0.000	ACUENCA	ST	2.4	6	0.015
	IN	28.4				IN	2.7		
PENDS	ST	0.7	30.7	0.000	LONG	ST	1.4	6	0.015
	IN	0.8				IN	1.7		
ORIENT	ST	107.4	4.5	0.034	AFS	ST	2.02	14.1	0.000
	IN	120.1				IN	2.62		
INSOL	ST	151.8	4.6	0.032	LFS	ST	1.2	14.2	0.000
	IN	149				IN	1.6		
RUGOS	ST	0.99	1.1	0.298	PENDM	ST	19.7	7.7	0.006
	IN	0.98				IN	23.3		
CURVAR	ST	0.08	5.2	0.023	VEGET	ST	12.4	2.8	0.095
	IN	-0.45				IN	11.7		
PERFIL	ST	0.003	0.123	0.726	GROSOR	ST	2.8	103.2	0.000
	IN	0.05				IN	3.9		

Tabla 3.7: Resultados del test T-Test para las variables que caracterizan la ladera y del test One.Way de varianzas múltiples (ST: celdas estables; IN: celdas con roturas). En el test T-test las variables con media y desviación estándar distinto entre las dos poblaciones (estable y con roturas) presentan alto poder discriminante entre ellas. En el test One-way altos valores de F indican que la variable discrimina entre las dos poblaciones.

### Selección de las variables para el análisis discriminante

Las variables seleccionadas a partir de los análisis previos han sido: PENDS y PEND (combinadas con las demás), MDE, ORIENT, INSOL, CURVAR, PLA, PENDM, GROSOR, VEGET, LFS, LONG y RUGOS.

Las variables PEND y PENDS se han utilizado en los análisis discriminantes posteriores por separado para observar su comportamiento en las distintas combinaciones realizadas. Ello es debido a su alto valor discriminante y a la alta correlación entre ellas. Otro criterio para la selección de las dos variables para el análisis discriminante es la importancia de la pendiente como factor causante de deslizamientos, importancia demostrada ampliamente en la literatura.

Las variables LFS, LONG, CURVAR y PLA se han seleccionado de entre otras variables con las que están muy correlacionadas (con ACUENCA y AFS las dos primeras y



con PERFIL la variable CURVAR), por su mayor poder discriminante en el test One-Way. Aunque RUGOS presenta un bajo poder discriminante se ha introducido en el análisis estadístico, entendiendo que quizás la definición de la variable es la causa de su baja discriminación. Situación parecida ocurre con la variable VEGET, variable que sorprende por su bajo valor discriminante, a pesar de la interpretación inicial intuitiva de su peso como factor predominante para definir la estabilidad de una ladera a los deslizamientos superficiales.

A partir de los análisis previos queda claro que la variable PERFIL queda fuera del análisis.

### **Análisis discriminante y selección de la mejor función discriminante**

Dependiendo del número y tipo de variables entradas en el análisis discriminante, se pueden realizar múltiples combinaciones de variables para comprobar su relación con la variable de agrupación (celdas estables y celdas con roturas). El método por pasos permite controlar qué variable entra en la función en cada paso dentro de los límites establecidos de entrada y salida (F de entrada y de salida) (véase Anejo 3 para la descripción del procedimiento).

Existen unas cuantas combinaciones posibles de variables para el análisis discriminante aunque la experiencia sobre la tipología de movimientos y la zona analizada, así como el tipo de variables usadas y la reducción de las variables seleccionadas para el análisis discriminante limitan el número de las mismas. Una buena manera de intentar realizar todas las combinaciones, o las que se crean más lógicas sin repetir análisis ya hechos es preparando una pequeña tabla como en la Tabla 3.8. En ella anotamos el F de entrada y salida, los porcentajes de aciertos de celdas estables, de las que tienen roturas y del total, así como las variables entradas en el análisis y las excluidas. Las variables entradas se pueden situar por orden según los coeficientes estandarizados utilizando el signo + o - según favorezcan la inestabilidad y la estabilidad respectivamente. Según la combinación de variables los signos pueden estar invertidos. La observación de los resultados de cada nueva combinación, junto con los análisis ya hechos nos permitirán decidir si finalizar el análisis o realizar algunos análisis más con otras combinaciones.

Con las variables PEND y PENDS por separado junto con las demás variables seleccionadas se han realizado distintas combinaciones de variables en el análisis discriminante. La tabla 3.8 muestra un resumen de los distintos análisis realizados.

Aunque cada zona de estudio es distinta, la experiencia en este tipo de procedimiento y con estas variables nos demuestra que la variable PEND o la PENDS (dependiendo de cual se utilice o cual de mejor resultado en el análisis) van a salir siempre en la función discriminante y con un coeficiente alto. Algo similar podemos decir de la variable PENDM pero con un peso más reducido. En cuanto a las variables categóricas dependerá de los rangos que tengan (si están relacionadas con la inestabilidad) y de su ponderación.

En el caso concreto de La Pobra de Lillet, como se podrá observar en la Tabla 3.8, la variable categórica, con sólo 3 rangos, GROSOR, tiene junto con la variable PEND o PENDS, el peso discriminante más elevado de todas las variables. En el caso de suprimir la variable GROSOR la función reduce el acierto de celdas inestables a un 75-78% desde el 87-90% inicial. Esto nos hace pensar que en otras áreas donde no se pueda disponer de una variable similar a esta, los resultados totales de aciertos de las funciones discriminantes

oscilarán entre 70 y 75%. Es importante tener esto en cuenta puesto que seguramente este último caso será el que se encontrará analizando una zona cualquiera del territorio con la mayor parte de las variables utilizadas aquí.

FE	FS	N°	$\lambda$	% R	% S	% T	VAR. DE LA FUNCIÓN	VAR. EXCLUIDAS
3.84	2.71	5	.606	87.3	71.8	78.7	GROSOR+, PEND-, MDE-, VEGET-, PLA-	PENDM, LFS, INSOL, LONG, CURVAR, RUGOS, ORIENT
2	1	7	.595	90.1	75.1	81.8	PEND+, GROSOR+, PENDM-, PLA-, MDE-, VEGET-, LONG+	LFS, INSOL, CURVAR, ORIENT, RUGOS
1	0	8	.592	89.4	74.6	81.2	PEND+, GROSOR+, PENDM-, MDE-, PLA-, LONG+, VEGET-, ORIENT+	LFS, CURVAR, INSOL, RUGOS
3.84	2.71	5	.598	88.0	73.4	79.9	GROSOR+, PENS+, MDE-, PLA-, VEGET-	PENDM, LFS, INSOL, LONG, CURVAR, RUGOS, ORIENT
2	1	7	.586	90.1	74.6	81.5	PENS+, GROSOR+, PENDM-, PLA-, MDE-, LONG+, VEGET-	LFS, INSOL, CURVAR, ORIENT, RUGOS
1	0	8	.583	90.1	74.0	81.2	PENS+, GROSOR+, PENDM-, MDE-, PLA-, LONG+, VEGET-, ORIENT+	LFS, CURVAR, INSOL, RUGOS

Tabla 3.8: Resultados de algunas de las distintas funciones discriminantes obtenidas con las variables seleccionadas para el análisis discriminante (FE: F de entrada que limita las variables que entran en la función incluyéndose aquéllas con valor de F mayor que el fijado; FS: F de salida que excluye las variables con valor inferior a este F establecido; N°: número de pasos de la función y por tanto de variables incluidas;  $\lambda$ : lambda de wilks, estadístico de control de la bondad de la función; % R: porcentaje de acierto de las celdas con roturas; % S: porcentaje de acierto de las celdas sin roturas; % T: porcentaje de acierto total; Var.: variables). La función seleccionada se muestra remarcada.

Así, los criterios para seleccionar la función discriminante final se basan tanto en el porcentaje de aciertos como en el número de variables introducidas en la función. En este sentido se selecciona la función con **mayor acierto de celdas inestables** y, a poder ser, con el **menor número de variables en la función**. Es importante tener presente que interesa clasificar bien las celdas con roturas antes que las estables. Los casos clasificados incorrectamente como asociados a roturas, que pertenecen a laderas estables en el terreno, son interpretados como áreas con una susceptibilidad (o potencialidad) elevada frente al deslizamiento y, por tanto, áreas que deben ser consideradas peligrosas en el futuro (Neuland, 1976; Carrara, 1983; Mulder, 1991; Baeza, 1994). Por el contrario, la clasificación incorrecta de la población inestable como laderas estables sólo se puede atribuir a algún tipo de error metodológico (relativo a la obtención de los datos y calidad de estos como del Modelo Digital del Terreno, uso incorrecto de las variables discriminantes, omisión de algún factor físico importante en la definición del tipo de estabilidad que se analiza, etc.).

Aunque en la selección de la función discriminante final se prioriza el acierto de celdas con roturas no debe descuidarse el acierto de celdas estables. Con ello queremos

destacar que se debe escoger aquella función que también tenga un grado aceptable de acierto de las celdas estables. Este mínimo debe establecerse según el criterio de experto sobre la zona que se estudia, según los datos con los que se trabaja y una vez se han realizado bastantes combinaciones de variables en el análisis discriminante. Con ello se está en condiciones de valorar los máximos aciertos a que puede llegar el análisis discriminante y por tanto se puede establecer un mínimo para las celdas estables, así como para las inestables.

La función seleccionada final y sus parámetros estadísticos se muestran en las tablas 3.9 y 3.10. Los valores discriminantes oscilan entre  $-3.1$  y  $3.4$  con centroides en  $-0.739$  para la población estable y  $0.916$  para la inestable. El porcentaje de casos correctamente clasificados es de  $81.8\%$  para un índice discriminante de  $DF = 0.0$ . En la figura 3.18 se muestran los histogramas por separado con las poblaciones estable inestable según la función discriminante. Los resultados muestran el acierto de las variables seleccionadas. Los pesos de las variables (coeficientes estandarizados) en la función discriminante significan su influencia y contribución relativa en la susceptibilidad a deslizamientos. Como se puede observar la variable PEND es la más discriminante con un peso de  $0.820$  seguida por la variable GROSOR con  $0.689$  y la pendiente media de la cuenca (PENDM) con  $-0.440$ . El resto de variables (elevación, curvatura transversal, vegetación y longitud de la cuenca) presentan pesos más bajos en la función.

Valores discriminantes positivos están asociados a roturas mientras que valores negativos se asocian a laderas estables. Además altos valores de las variables PEND, GROSOR y LONG aumentan los valores de la función, incrementando la inestabilidad. Altos valores de las variables PENDM, PLA, MDE y VEGET incrementan la estabilidad. En resumen, pendientes medias-altas de las laderas con espesores de depósitos superficiales grandes y longitudes de cuenca grandes favorecen las roturas superficiales. Por otro lado, pendientes medias altas de las cuencas, zonas convexas, vegetación densa y altitudes elevadas favorecen la estabilidad en el área estudiada, a pesar de que a mayor altitud más precipitación (aunque en esta zona corresponde a menos formación superficial).

Estos resultados parecen confirmar los obtenidos por Baeza (1994) exceptuando la variable elevación (MDE). En este análisis la elevación se relaciona con la litología del área (factor no utilizado) de forma que ciertas litologías, situadas en las partes bajas del área (margas azules, areniscas de tipo turbidítico, arcillitas y limolitas) presentan depósitos superficiales, mientras que las zonas más elevadas del área están constituidas por otras litologías (lutitas rojas, areniscas, conglomerados y calizas) que presenta escasa o nula formación superficial. Si se tiene en cuenta que la mayor parte de los deslizamientos en la zona de al Pobla de Lillet afectan a la formación superficial, es comprensible este resultado.

La fiabilidad de la función discriminante no sólo depende de unos buenos resultados en la clasificación sino también de la buena separación de las dos poblaciones (celdas estables e inestables). Ello se expresa con el estadístico Lambda de Wilks (que debe ser un valor pequeño, cercano a 0) y el Eigenvalue que debería ser 1 o superior. Debido a esto, aunque la tabla Resumen con la clasificación final de un análisis, dé como resultados porcentajes de aciertos elevados tanto para celdas estables como inestables, ello no implica una buena separación de las dos poblaciones. Esto último ocurre en la mayor parte de las funciones realizadas en el procedimiento descrito.

Como acabamos de citar, con este procedimiento no se obtienen funciones discriminantes muy buenas. Esto es, funciones que puedan separar bien las dos poblaciones estables/inestables. Ello nos lleva a pensar en algunas posibles explicaciones. La primera

podría ser la manera de obtener la muestra a analizar donde únicamente las celdas con roturas han sido identificadas como tales con foto aérea y trabajo de campo. El resto de celdas se definen como celdas sin roturas (a priori estables) y de todas ellas se escoge una muestra al azar. Para tal fin se utiliza todo el territorio, incluyendo aquellas zonas sin posibilidad de rotura superficial como líneas de crestas, lomas, valles fluviales, cantiles rocosos, etc. Esto conduce a una amplia variedad y rango de valores para la mayor parte de las variables, rango que se vería reducido si sólo se analizaran laderas propiamente dichas. Ello puede conducir al solape, en un rango relativamente amplio de valores, de las dos poblaciones a separar. Por tanto quizás, las laderas (en el análisis celdas) estables o sin roturas deberían estar identificadas con el mismo procedimiento que las laderas con roturas (identificadas con foto aérea y en el campo).

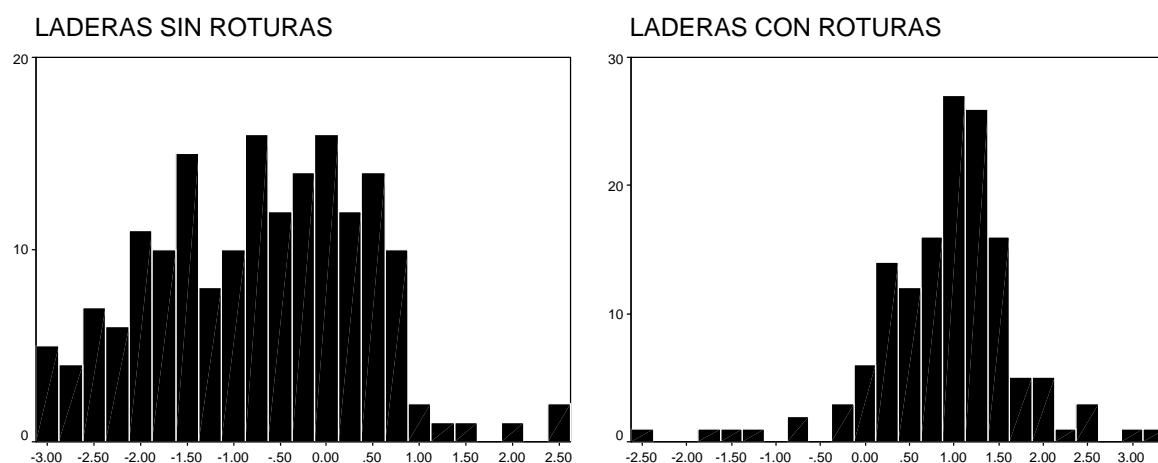


Figura 3.18: Histogramas de frecuencias con los valores de la función discriminante seleccionada en la Pobla de Lillet, para la muestra utilizada, con las dos poblaciones por separado (laderas con y sin roturas). Obsérvese el valor  $F = 0$  que separa las dos poblaciones según la función, indicando los valores positivos laderas inestables y los negativos laderas estables.

Otro motivo es la incertidumbre en la asignación de celdas estables. En principio éstas son todas las que no presentaron roturas en las intensas precipitaciones de Noviembre de 1982 (en el caso de La Pobla), pero esto no quiere decir que algunas de ellas no fueran susceptibles a la rotura. Cabe considerar la posibilidad que si en las zonas más bajas del área la lluvia fue menos intensa, en estas zonas no se llegó al umbral necesario para producir roturas. Esto se traduce en celdas sin roturas pero no por ello celdas poco susceptibles.

Otra explicación puede ser el trabajar con modelos y no con valores reales recogidos en el campo. Las variables utilizadas son modelos del terreno derivadas del modelo de elevaciones. Todo ello conduce a un suavizado de los valores relativos a la geometría y características de las laderas que influye en el análisis (es lo que se conoce como efecto soporte en geostatística). Finalmente, la resolución de los modelos utilizados (celdas  $15 * 15m$ ) con respecto a la dimensión de los deslizamientos estudiados (las zonas de rotura) puede influir en los resultados del análisis. No todos los deslizamientos son del mismo tamaño y, por tanto, no todas las zonas de rotura se ajustan al tamaño de celda utilizado.

Esto se puede comprobar en los resultados de la función discriminante seleccionada (ver tablas 3.9 y 3.10 y la figura 3.18), donde se observa un valor no muy pequeño de la Lambda de Wilks, centroides poco separados y resultados de aciertos finales buenos, pero que no deben engañar. Como se observa los resultados finales son buenos para la muestra de

celdas con roturas observadas, reduciéndose al 75% en el caso de las estables. En el 25 % restante se consideran que hay celdas potencialmente inestables pero que todavía no han roto.

Una vez escogida la función deberemos tener presentes los coeficientes no tipificados para generar la malla regular discriminante en el paso siguiente. En el caso de la Población de Lillet los coeficientes se muestran en la tabla 3.10.

### Generación del Mapa de Susceptibilidad

El Mapa de Susceptibilidad es el objetivo final de todo el procedimiento descrito y por ello deben quedar claros los criterios de su elaboración. La pieza clave en el mapa de susceptibilidad es **cómo establecer los niveles o categorías de susceptibilidad**. Es evidente que, dependiendo del criterio utilizado para definir los niveles, a partir de una misma función discriminante se pueden obtener mapas de susceptibilidad distintos.

VARIABLES INTRODUCIDAS	PASO	VARIANZA RESIDUAL
GROSOR	1	0.751
PEND	2	0.677
PLA	3	0.648
MDE	4	0.627
VEGET	5	0.605
PENDM	6	0.599
LONG	7	0.593

Tabla 3.9: Resultados del análisis discriminante por pasos, con el número de pasos, la variable introducida en cada paso y la varianza residual. En cada paso se introduce la variable que minimiza la suma de la variación no explicada de todos los pares de grupos. La F parcial mínima para entrar es 2 y la F máxima parcial para salir es 1.

VARIABLES	COEFICIENTES DE LA FUNCIÓN	
	Estándar	No estándar
PEND	0.820	0.108
GROSOR	0.689	0.761
PENDM	-0.440	-0.038
PLA	-0.336	-0.257
MDEFILL	-0.320	-0.002
VEG	-0.291	-0.078
LONG	0.291	0.357
constant		-1.927

EIGENVALUE	WILKS- $\lambda$	$\chi^2$	PROB. %	CLASIFICACION (F = 0)
0.682	0.595	162.438	0.000	General 81.8 % Parcial (estable/inestable) 75.1% / 90.1%

Tabla 3.10: Función discriminante con los coeficientes estandarizados y los no estandarizados, el porcentaje de aciertos de la clasificación y otros parámetros estadísticos de la Población de Lillet.

El criterio aquí utilizado es el de dividir los valores de la malla regular discriminante en rangos iguales (sean 10, 7 o 5). Este procedimiento es discutible puesto que no tiene en cuenta la situación de los centroides de las dos poblaciones en la función, ni los rangos que toman las dos poblaciones en la función, ni el índice discriminante  $F=0$  que limita las dos poblaciones estable / inestable, etc.. Aunque el criterio escogido parece que no es el más acertado, tiene una gran ventaja: se suprime la subjetividad que se pudiera utilizar para establecer los rangos. También cabe decir que una cosa son los valores de la función discriminante en la muestra, y otra cosa son los valores en la malla regular, compuesta por muchas más celdas y con rangos de valores de las variables de la función, más amplios que los de la muestra utilizada. Por ello creemos que establecer rangos equidistantes es un método adecuado. El mapa de susceptibilidad se puede ver en la figura 3.19. La figura 3.20 muestra una imagen en 3D de la zona SW de la Población de Lillet con el mapa de susceptibilidad resultante y los deslizamientos inventariados de esta zona. El efecto de visibilidad está creado con los comandos SURFACE de ARC/INFO (ESRI, Surface Modelling with TIN, 1994).

### Validación de la función y comprobación de resultados

El índice de densidad relativa utilizado (Baeza, 1994) expresa el grado de ajuste de la función para predecir roturas que, en este caso, pertenecen al mismo evento pero no han sido utilizadas en el análisis. El índice se expresa mediante el cociente entre el número de deslizamientos dividido por el número de celdas (área) de un nivel determinado de susceptibilidad y el sumatorio de esta misma relación de todos los niveles de susceptibilidad. El índice se expresa en porcentaje y aumenta su valor hacia los niveles más susceptibles a producir roturas. Con este índice es de esperar valores 0 en los primeros niveles que indican ausencia de roturas y valores altos en los niveles más susceptibles expresando existencia de movimientos en niveles de área reducida (alta susceptibilidad).

En el caso de la Población de Lillet el índice (ver tabla 3.11) muestra un comportamiento esperado para los niveles de susceptibilidad baja y crece a medida que aumenta la susceptibilidad, exceptuando el último nivel. En éste el índice es 0 debido a la ausencia de movimientos representando este nivel el 0.02 % del área total. Como se puede observar en la tabla 3.11 los niveles con mayor área (más número de celdas) son los centrales, reduciéndose rápidamente el número de celdas hacia los niveles extremos.

Nivel de susceptibilidad	Nº de mov.	Nº de celdas	Indice
Muy baja	0	258	0.000
Bastante baja	0	6634	0.000
Baja	1	55124	0.245
Moderada	18	74685	3.255
Alta	100	38582	35.009
Bastante alta	9	1977	61.49
Muy alta	0	49	0.000

Tabla 3.11: Resultados del índice de densidad relativa en el área de La Población de Lillet.

Otra forma de validar los resultados es visualmente, superponiendo al mapa de susceptibilidad final los deslizamientos inventariados. Si además esto se realiza utilizando las funciones de visibilidad de ARC/INFO en 3D ello permite una mejor visualización y contrastación (ver figura 3.20). Esto se puede realizar con todos los deslizamientos inventariados (es el caso de la figura citada), con los utilizados para obtener la función (en

- LA POBLA DE LILLET (Barcelona) -  
**MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A LA ROTURA DE  
 LA LADERA POR DESLIZAMIENTOS SUPERFICIALES**

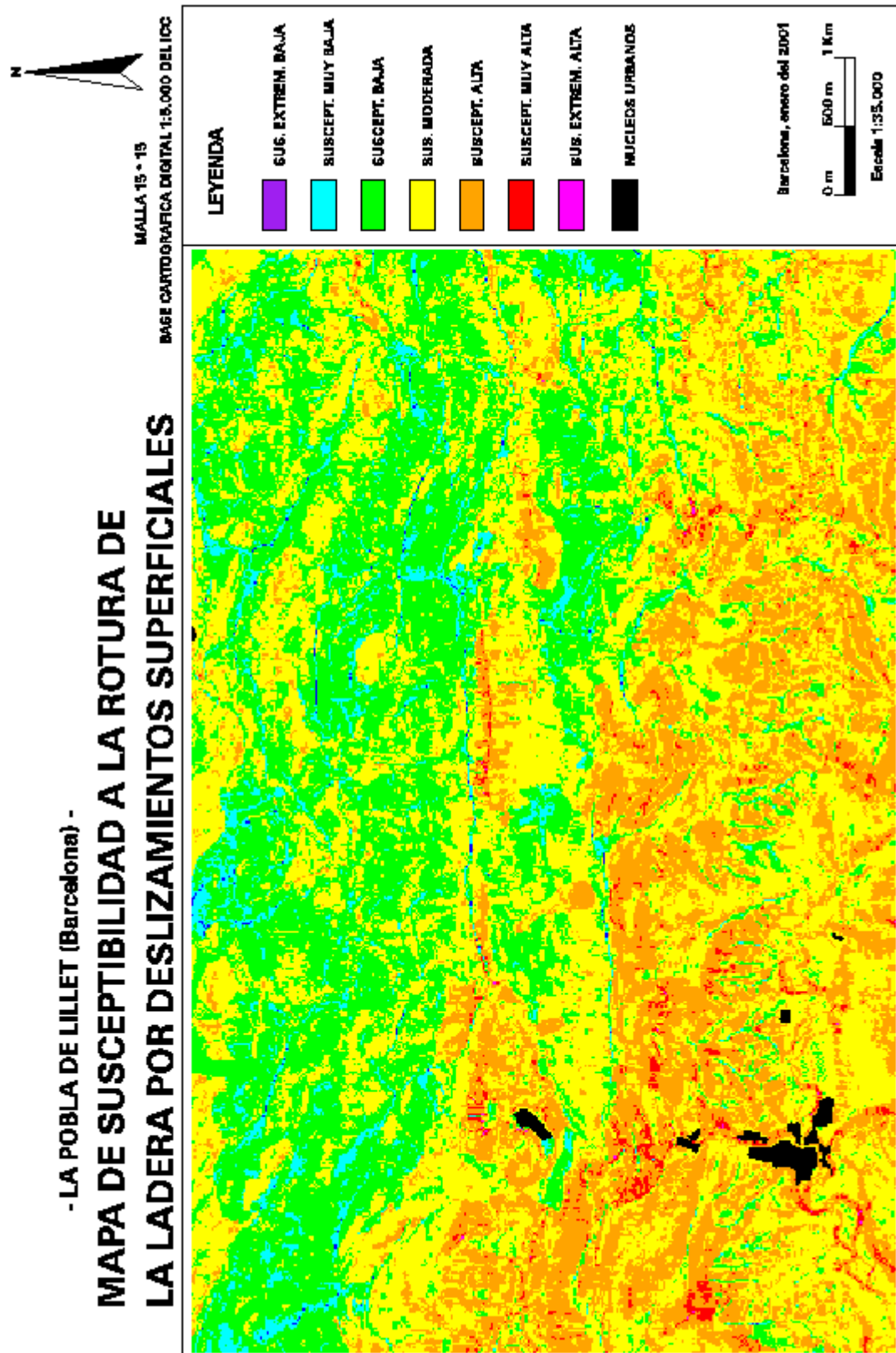


Figura 3.19: Mapa de susceptibilidad a los deslizamientos superficiales de la Poble de Lillet.

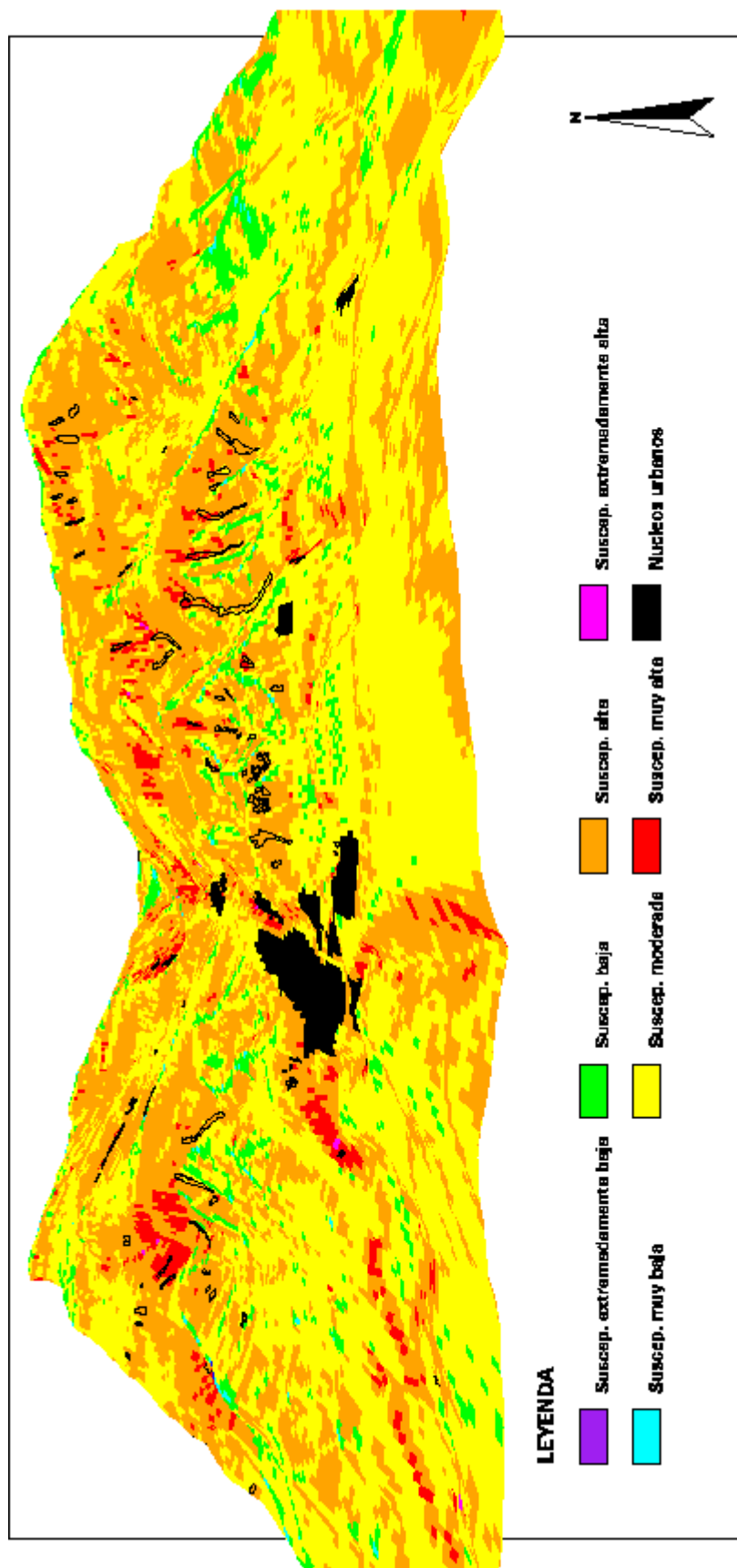


Figura 3.20: Imagen en 3D del mapa de susceptibilidad a los deslizamientos superficiales de la zona SW de la Pobla de Lillet con los deslizamientos superpuestos al mapa, efecto que sirve como método visual para validar los resultados.



caso de validar el acierto de la función) y con los deslizamientos restantes no utilizados para el análisis (si se quiere validar la predicción de la función).

Como se puede observar en la tabla 3.11 el número de celdas de los 7 niveles de susceptibilidad definidos refleja una distribución normal y no una distribución bimodal, como cabría pensar en el caso de tener dos poblaciones muy distintas. Ello es lógico si se tiene en cuenta lo que se está analizando, que en nuestro caso es todo un territorio constituido por zonas llanas, ríos, divisorias de agua y laderas. Estas últimas, a su vez, no constituyen dos poblaciones muy bien definidas y separadas en cuanto a características de la ladera se refiere y su susceptibilidad a roturas superficiales, si no que por el contrario, constituyen un rango amplio de laderas de distinto grado de susceptibilidad. Esto sumado al método de estimación de la susceptibilidad utilizado, que ya se ha comentado no permite separar bien las dos poblaciones, debido en parte al uso de variables derivadas de un MDE, son el motivo de la distribución normal de las celdas en los niveles de susceptibilidad. La definición de los niveles de susceptibilidad utilizada en esta memoria facilita este tipo de distribución. A nuestro entender, la única manera de disponer de una distribución bimodal en el número de celdas de los niveles de susceptibilidad definidos sería analizando únicamente laderas, y no todo el territorio, y en todo caso, analizando las laderas de signo más opuesto o situadas en los extremos (más y menos susceptible), y definidas previamente en el campo.

La tabla 3.11 muestra que se encuentran 18 deslizamientos de los 128 utilizados para validar la predicción de la función discriminante, en el nivel de susceptibilidad moderada. Como se observa, este nivel es el mayor en cuanto a área se refiere. Un pequeño ejercicio de comprobación, para saber donde se sitúan estos deslizamientos se ha llevado a cabo, dividiendo a su vez, este nivel en 3 niveles de igual rango de valores discriminantes. Los resultados se muestran a continuación:

Nivel de susceptibilidad	Nº de mov.	Nº de celdas	Índice
Moderada baja	2	24865	11.17
Moderada	1	24793	5.601
Moderada alta	15	25027	83.229

Aplicando el mismo índice de densidad relativa en los 3 subniveles de susceptibilidad moderada se observa que 15 de los 18 deslizamientos correspondientes a este nivel, se encuentran en el subnivel más susceptible. Los 3 subniveles presentan un área parecida y el índice presenta valores no crecientes debido al nivel menos susceptible donde se han ubicado dos deslizamientos. A pesar del comportamiento no creciente del índice, los resultados muestran satisfactoriamente como la mayor parte de los deslizamientos se sitúan en el subnivel más susceptible.

También se ha llevado a cabo una pequeña comprobación de las 49 celdas correspondientes al nivel de susceptibilidad más elevado (véase tabla 3.11). En el Anejo 3 se presentan la tabla de datos (tabla1) con las 49 celdas y los valores correspondientes de las variables incluidas en la función discriminante y de la misma función. Como es de esperar, según la función, las celdas deben tener valores de PEND altos, GROSOR con valor de 4, PENDM bajos, valores de la variable PLA negativos y elevados, la altitud baja, valores de VEGET bajos y longitudes de cuenca altos para pertenecer a este nivel de susceptibilidad. Pero, teniendo en cuenta que la función discriminante es una combinación lineal de estas variables, cabe esperar que en algunas ocasiones, algún valor considerablemente elevado o

reducido, esto es, un caso aislado o extremo, de alguna variable permita la inclusión en este nivel de susceptibilidad a alguna celda que no presenta estrictamente las características necesarias. Y esto es lo que ocurre en algunos casos. Por ejemplo, la mayoría de las celdas presentan valores de PEND superiores a 25° excepto 4 (dos con 21° y otras dos con 18). Estos últimos valores, que tampoco son demasiado bajos para la pendiente, pertenecen a celdas con valores excesivamente altos de la variable PLA en dos casos y de la variable LONG en otros dos. Este efecto conlleva la errónea inclusión o asignación de celdas en niveles de susceptibilidad que no les corresponde. En el caso que comentamos las celdas que no deberían estar aquí son las que presentan valores de la variable LONG muy altos, dado que estos valores indican que la celda pertenece al lecho de un río.

Otros ejemplos de este efecto que se pueden apreciar en la comprobación de las 49 celdas antes referidas, es la inclusión de celdas con valores de PEND superiores a 45°. Ello es normal dado que la variable PEND es la que presenta el coeficiente estandarizado más elevado, pero no es correcto si se tiene en cuenta que a partir de 45 ° escasean los depósitos superficiales sobre el substrato rocoso debido a la pendiente misma del terreno. Por tanto estas celdas, la mayoría con substrato rocoso, son errores debidos a la limitación del método utilizado (combinación lineal de la función discriminante) y de la variable utilizada (en este sentido la variable PENDS utilizada en otras funciones intenta disminuir este error). Otro error son las celdas con valores de PEND superiores a 45 ° y con depósitos superficiales de espesor superior a 0.5 m, incluidas en esta categoría. Estas celdas pueden ser debidas a tres tipos de errores: por un lado los errores debidos al modelo digital de elevaciones de partida y su precisión, por otro, los errores inherentes al efecto de rasterización de las variables categóricas en formato vectorial, esto es, errores debidos al trabajo llevado a cabo en formato raster y, finalmente errores de digitalización y/o recogida errónea de la información. En el primer caso se trata de un error debido a la imprecisión del propio modelo y del tamaño de celda utilizado, error que no se puede subsanar. El segundo error es debido a la rasterización de la información vectorial con el tamaño de celda que se utiliza. El error puede ser subsanado, aunque si se hace de forma automática con las herramientas disponibles en ARC/INFO, se pueden producir nuevos errores donde antes no los había (consultar el Capítulo 6 de la memoria). El último error es el más fácil de verificar y enmendar. Estos errores, junto con otros serán tratados en el Capítulo 6 de la presente memoria dedicado a los errores en general.

Finalmente se ha comprobado el nivel de susceptibilidad más bajo que presenta 258 casos o celdas (ver la tabla 2 de datos en el Anejo 3). Lo que se puede constatar de esta tabla es que la pertenencia a este nivel no es debida, principalmente, a valores bajos de la variable PEND sino a valores 0 de las variables PENDM y LONG que indican que nos encontramos al inicio de la cuenca. De las 258 celdas 62 presentan valores de PEND superiores a 10° de las cuales 19 tienen un espesor de la formación superficial inferior a medio metro. También se constata la influencia de valores altos de la elevación y de la variable PLA (perfil convexo transversal a la ladera).

Resumiendo, la comprobación nos ha permitido verificar la limitación del procedimiento utilizado (combinación lineal de varias variables) y la existencia de errores debidos a la limitación del propio método en el SIG, a la resolución y precisión del MDE utilizado y a otras causas como la rasterización de las variables vectoriales. Asimismo, cabe pensar que el mismo fenómeno se puede encontrar en los niveles restantes. A pesar de ello, cabe esperar que una buena parte de las celdas no presentan valores extremos en ninguna de las variables de la función discriminante y, por tanto, su estimación de la susceptibilidad se puede considerar correcta.

**Resultados con la variable PENDS (pendiente senoidal)**

Como se ha comentado en los párrafos anteriores la variable PENDS (pendiente senoidal de la ladera) intenta evitar el error de asignar a celdas con pendientes altas, por encima de los 45°, altos valores de susceptibilidad a la rotura por deslizamiento superficial. La función anterior seleccionada para la Población de Lillet se ha escogido por su clasificación y por utilizar la variable PEND sin transformar. Pero parece claro que existen errores debidos al hecho de utilizar esta variable. Según la función la pendiente es la variable que presenta el coeficiente estandarizado más elevado y ello se traduce en la relación lineal de a mayor pendiente mayor inestabilidad, lo cual, como se ha comentado, no es cierto y conduce a error en algunos casos.

Para comprobar si se puede reducir este error se presenta en este apartado los resultados del análisis utilizando la función discriminante con la variable PENDS (ver tabla 3.12a). Las variables son las mismas utilizadas en la anterior función. Los centroides de las poblaciones se encuentran en -0.753 para el grupo estable y 0.934 para el inestable. Los resultados del índice de fiabilidad se muestran en la misma tabla. La figura 3.21 muestra el mapa de susceptibilidad de la Población de Lillet obtenido de la función discriminante con la variable PENDS.

A)

VARIABLES	COEFICIENTES DE LA FUNCIÓN	
	Estándar	No estándar
PENDS	0.844	4.927
GROSOR	0.673	0.744
PENDM	-0.454	-0.040
PLA	-0.331	-0.253
MDE	-0.330	-0.002
VEG	-0.265	-0.071
LONG	0.328	0.403
constant		-2.876

EIGENVALUE	WILKS-λ	χ <sup>2</sup>	PROB. %	CLASIFICACION (F = 0)
0.708	0.586	167.216	0.000	General 81.5 % Parcial (estable/inestable) 74.6% / 90.1%

B)

Nivel de susceptibilidad	Nº de mov.	Nº de celdas	Indice
Muy baja	0	197	0.000
Bastante baja	0	3187	0.000
Baja	0	28276	0.000
Moderada	4	79405	0.695
Alta	82	58901	19.200
Bastante alta	42	7231	80.105
Muy alta	0	111	0.000

Tabla 3.12: A) Función discriminante con los coeficientes estandarizados y los no estandarizados, el porcentaje de aciertos de la clasificación y otros parámetros estadísticos de la Población de Lillet utilizando la variable PENDS. B) Resultados del índice de densidad relativa en el área de La Población de Lillet con la variable PENDS.

- LA POBLA DE LILLET (Barcelona) -

### MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A LA ROTURA DE LA LADERA POR DESLIZAMIENTOS SUPERFICIALES

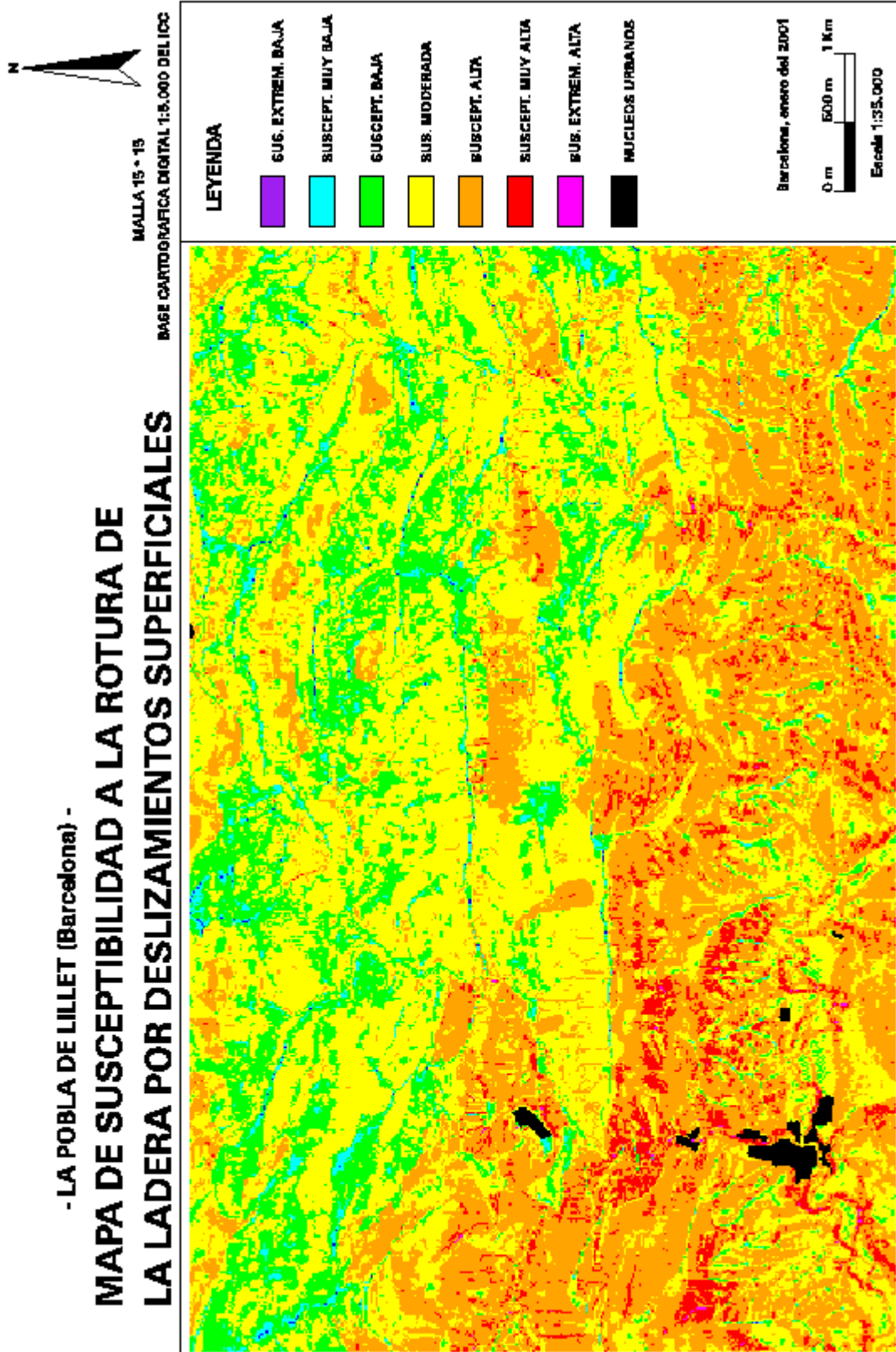


Figura 3.21: Mapa de susceptibilidad a los deslizamientos superficiales de la Pobla de Lillet con la variable PENDS (pendiente senoidal).

En la tabla 3.12 el índice de densidad relativa presenta mejores resultados que en la función anterior con la variable PEND. En este caso el nivel de susceptibilidad muy alta está constituido por 111 celdas. En el Anejo 3 se presenta la tabla de datos (tabla 3) con estas celdas y los valores correspondientes de las variables incluidas en la función discriminante y de la misma función a excepción de la pendiente, que para mayor comprensión se presenta la variable PEND, no la variable PENDS.

Los resultados muestran que con esta función sólo se encuentran 4 celdas con valores de pendiente superiores a 45 °, a diferencia de los 16 casos de la anterior función. También ha disminuido el número de celdas pertenecientes a substrato rocoso que se encuentran en el nivel más susceptible respecto a la función anterior con PEND (de 12 celdas a 6). En la tabla del Anejo 3 se puede observar que estas 6 celdas se incluyen en este nivel debido a valores muy altos de la variable PLA (curvatura perpendicular a la dirección de la pendiente) combinados con valores relativamente altos de la pendiente o bien a valores muy altos de la longitud de la cuenca (LONG).

Como conclusión, queda claro que el utilizar la variable PENDS ha mejorado los resultados del análisis en la Población de Lillet y ha reducido errores debidos a la fuerte influencia y al comportamiento de la pendiente de la ladera con la estabilidad. Pese a ello errores debidos a valores extremos de algunas variables no se han evitado.

#### **3.3.4. APLICACIÓN A VALLCEBRE**

En este apartado se presentan los resultados del análisis de susceptibilidad a los deslizamientos superficiales del área de Vallcebre. La Figura 3.22 muestra el mapa de distribución de los deslizamientos superficiales del evento de 1982. En esta área se ha utilizado el modelo digital de elevaciones relleno (corregido) para derivar el resto de modelos del terreno. En el Anejo 3 se puede consultar el procedimiento seguido.

##### **Ajuste y ponderación de variables**

Para el área de Vallcebre se han realizado los mismos ajustes y ponderaciones llevados a cabo en el área de La Población de Lillet.

##### **Ajuste**

Las variables ACUENCA, LONG, AFS, y LFS, referidas a área y longitud de cuenca acumulada, se han ajustado sumando la constante 1.1 a toda la malla regular para evitar valores omitidos (NODATA) cuando sean transformadas a logaritmo decimal.

La variable ORIENT, que es la orientación de la ladera, se ha transformado de 0 - 360 a 0 -180 para evitar tener que trabajar con estadística circular. El efecto borde de la variable RUGOS (rugosidad del terreno) también ha sido ajustado.

Finalmente se ha transformado la variable PEND a una función matemática senoidal creándose la nueva variable PENDS, que se ajusta mejor al comportamiento de la pendiente respecto a las zonas de rotura de los deslizamientos superficiales. No obstante ello, las dos variables van a ser utilizadas en el análisis.

**Ponderación**

La ponderación se ha realizado en las variables cualitativas VEGET y FMS (presencia/ausencia de la formación superficial) con el mismo criterio utilizado para el caso de La Población de Lillet (ver apartado 3.3.3). En las siguientes líneas se muestran las ponderaciones.

Variable VEGET

SIGNIFICADO	PONDERACION
Sin vegetación	1
Prado natural	6
Prado antrópico, terrazas, cultivos	12
Bosque denso	15
Bosque abierto	12
Bosque bajo, matorral	9
Ríos, cicatrices, minas	1
Núcleos urbanos	0 (NO ENTRA EN EL ANÁLISIS)

Variable FMS : Representa la presencia o ausencia de formación superficial con dos categorías cuyo criterio de ponderación sigue el utilizado para la variable GROSOR de La Población de Lillet. La existencia de formación superficial se cree es determinante para la formación de deslizamientos superficiales.

SIGNIFICADO	PONDERACIÓN
Roca (sin formación superficial)	1
Formación superficial	4

**Obtención de la muestra utilizada en el análisis**

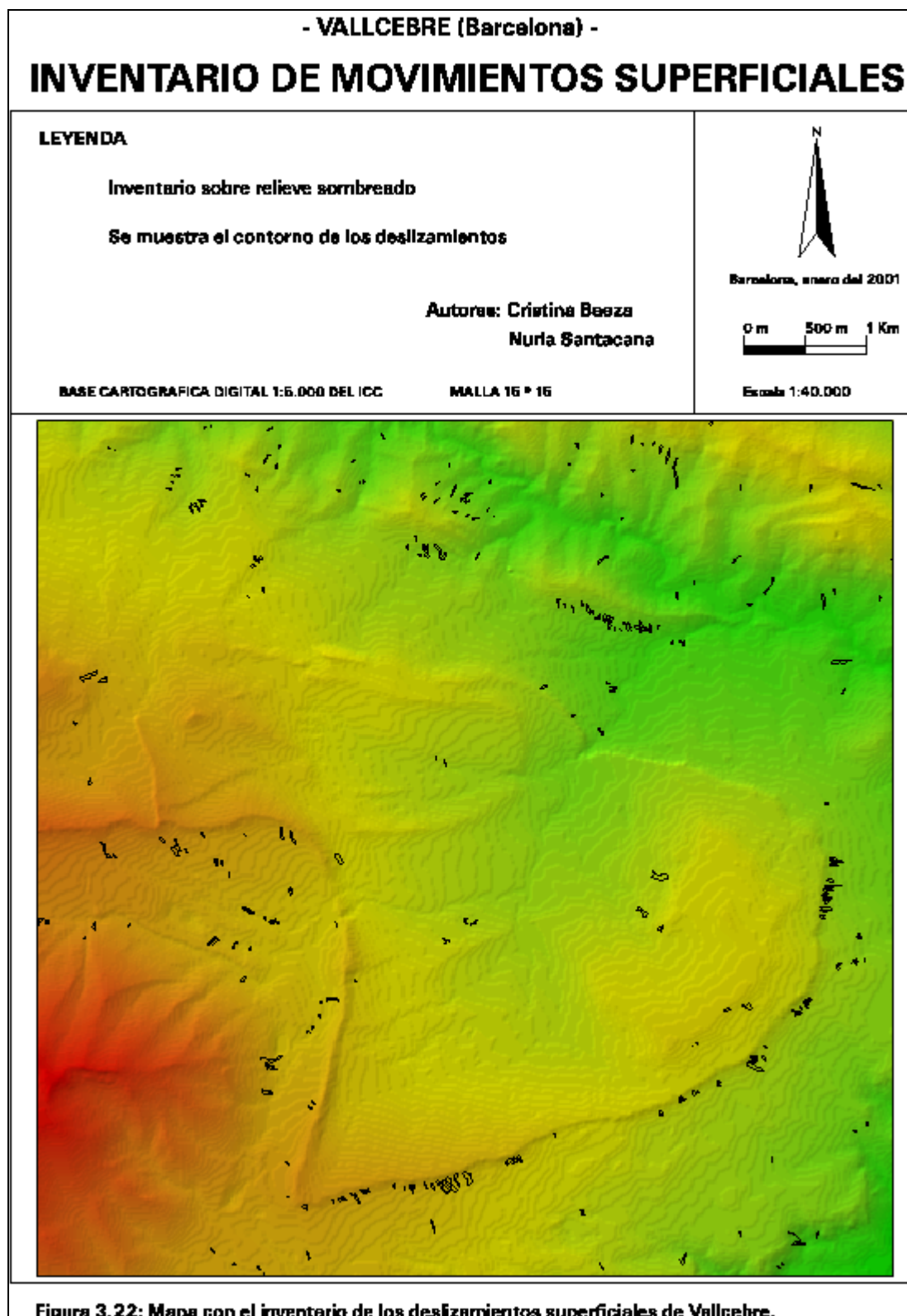
Se ha utilizado una muestra al azar con la mitad de las celdas inestables del área y con un número similar de celdas estables (ver figura 3.23) siguiendo el procedimiento descrito en el Anejo 3.

**Test de Normalidad de las variables y transformación de algunas variables**

Los histogramas con las distribuciones de las variables y los resultados del Test de Kolmogorov-Smirnov se observan en las figuras 3.24 y 3.25 y en la tabla 3.13 respectivamente. Se han realizado las mismas transformaciones que las realizadas en el área de la Población de Lillet para las variables ACUENCA, LONG, AFS y LFS.

**Análisis Factorial de Componentes Principales**

La matriz de correlaciones, al igual que los resultados del análisis Factorial muestran la dependencia entre las variables ACUENCA y LONG; AFS y LFS; PEND y PENDS y, finalmente, CURVAR con PERFIL y PLA (ver tabla 3.14). Estas dependencias también se han encontrado en el área de La Población de Lillet.





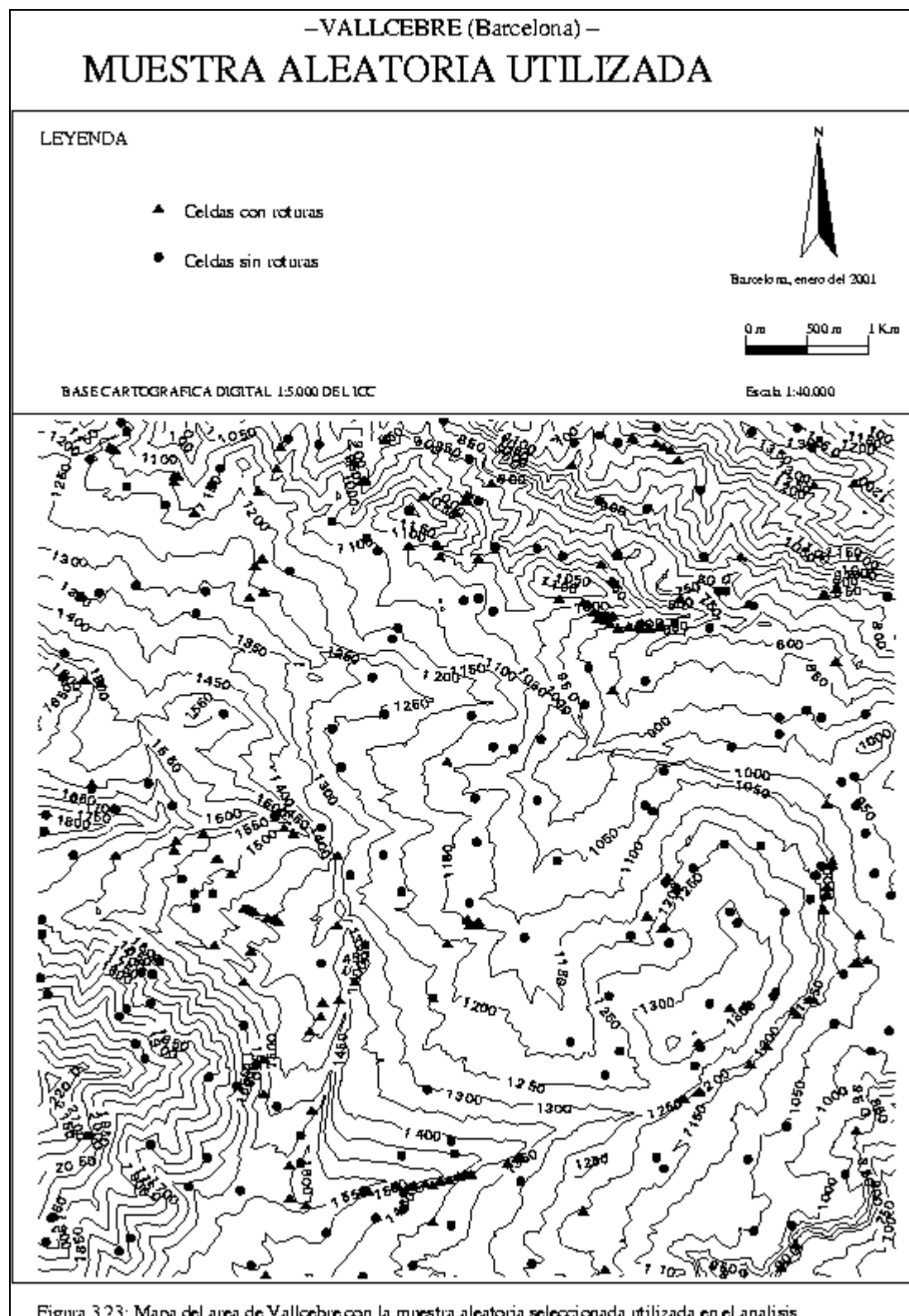


Figura 3.23: Mapa del area de Vallcebre con la muestra aleatoria seleccionada utilizada en el analisis.

Variables	Sin transformación		Con transformación (log <sub>10</sub> )	
	Z of K-S	Sig.	Z de K-S	Sig. Asintótica
MDE	1.378	0.045		
PEND	0.917	0.370		
PENDS	2.258	0.000		
ORIENT	2.067	0.000		
INSOL	2.310	0.000		
RUGOS	4.852	0.000		
CURVAR	2.771	0.000		
PERFIL	2.319	0.000		
PLA	2.779	0.000		
ACUENCA	8.679	0.000	4.532	0.000
LONG	6.315	0.000	2.591	0.000
AFS	6.974	0.000	4.969	0.000
LFS	3.962	0.000	3.115	0.000
PENDM	1.681	0.007		

Tabla 3.13: Resultados del test de Kolmogorov-Smirnov del área de Vallcebre.

Los resultados de la tabla 3.15 muestran que los tres primeros factores representan el 59 % de la varianza total explicada, alcanzando un 85 % cuando se consideran los 6 factores resultantes. Así mismo de la tabla 3.16 se desprende que la varianza total de cada una de las variables explicadas por los 6 factores (comunalidades) supera el 38 % (con la variable RUGOS) siendo las variables CURVAR, PEND, ACUENCA y LONG las mejor representadas con más de un 94 % de la varianza.

El análisis muestra los 6 factores siguientes (ver tabla 3.17):

El primer factor que explica el 24 % de la varianza total de la muestra, está representado por las variables relativas a la cuenca (ACUENCA, LONG, AFS y LFS) con una representación inferior de la pendiente media de la cuenca y el perfil transversal de la ladera (PENDM y PLA). Como en el caso de La Pobla de Lillet este factor expresa la capacidad de converger mayor o menor cantidad de agua hacia la zona potencial de rotura. En la matriz de correlaciones (tabla 3.14) se observan las altas correlaciones entre las variables principales representadas por el factor.

El segundo factor que explica un 19.6% de la varianza total está representado por las variables referidas a la pendiente y por la insolación (PEND, PENDS, INSOL y PENDM). Este factor expresa la influencia de la pendiente de la ladera y su orientación respecto al sol en la ocurrencia de deslizamientos. En la matriz de correlaciones (ver tabla 3.14) se observa la alta correlación entre PEND y PENDS siendo la correlación con INSOL de 0.7.

El tercer factor que explica un 15.5 % de la varianza total está representado por las variables referidas a la curvatura de la ladera (PERFIL, CURVAR y PLA). El factor expresa parte de la morfología de la ladera en distintos perfiles según el grado de convexidad y concavidad. Como se observa en la matriz de correlaciones (tabla 3.14) las tres variables que representan curvatura están correlacionadas más de un 0.8 a excepción de las variables PERFIL y PLA entre sí, debido a que explican cosas distintas (curvatura en la dirección de máxima pendiente y en la dirección transversal a al máxima pendiente, respectivamente).

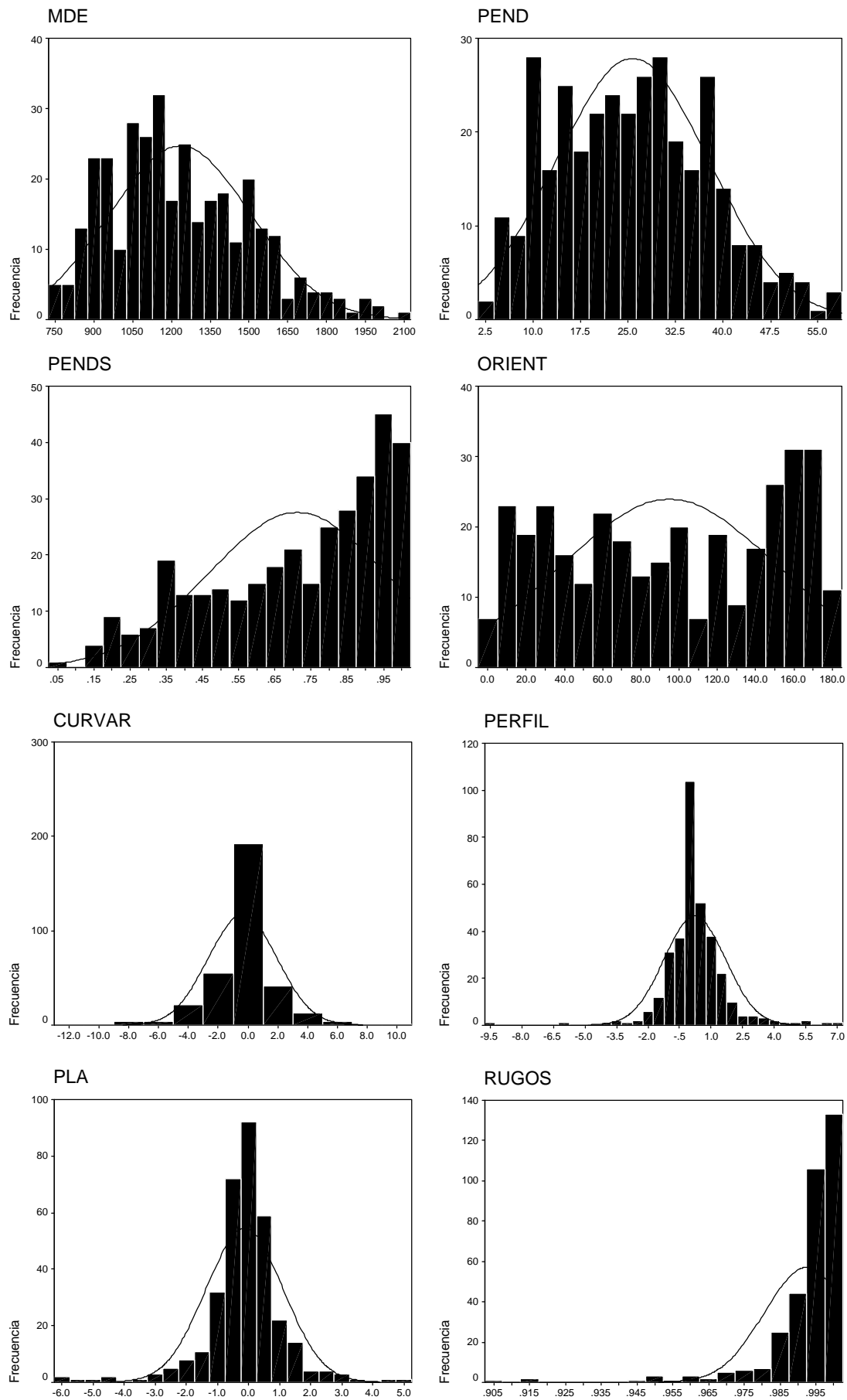


Figura 3.24: Histogramas de frecuencias con la curva normal de algunas de las variables derivadas del MDE y de las variables categóricas de la zona de Vallcebre.

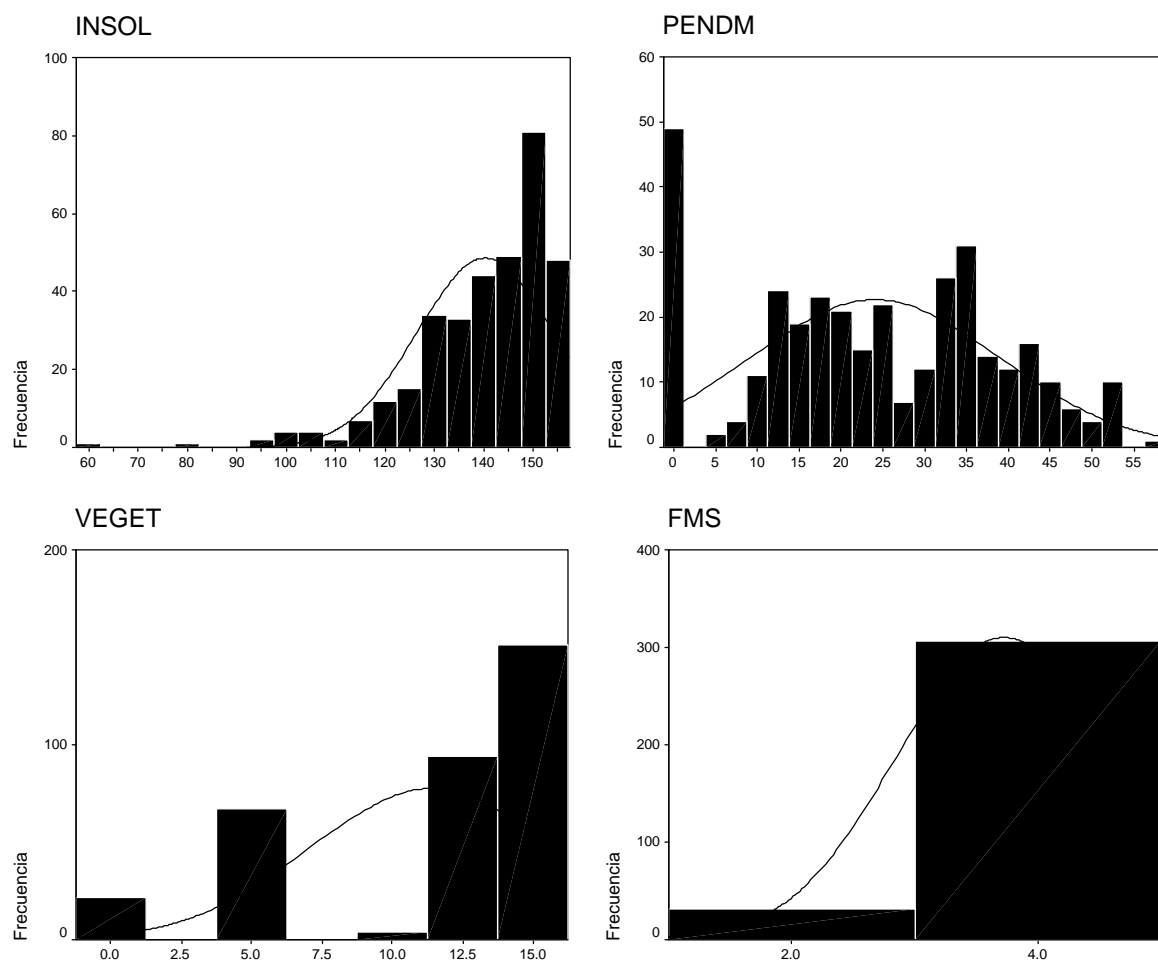


Figura 3.24 (continuación): Histogramas de frecuencias con la curva normal de algunas de las variables derivadas del MDE y las variables categóricas de Vallcebre.

El cuarto factor con un 11.1 % de la varianza total está representado por las variables vegetación, presencia de formación superficial (FMS, VEGET) y en proporción mucho menor por el área cuenca. El factor expresa la relación entre la vegetación y la presencia de formación superficial donde la ausencia de esta última (presencia de roca) conlleva ausencia de vegetación.

El quinto factor con un 8.3 % de la varianza total está prácticamente representado por la variable ORIENT y en proporción mucho menor por la vegetación. Este factor expresa la influencia de la orientación de la ladera en la formación del tipo y densidad de vegetación.

El sexto factor con un 6.5 % de la varianza total está representado únicamente por la variable elevación (MDE). En la figura 3.26 se muestra la proyección de las variables en un espacio tridimensional.

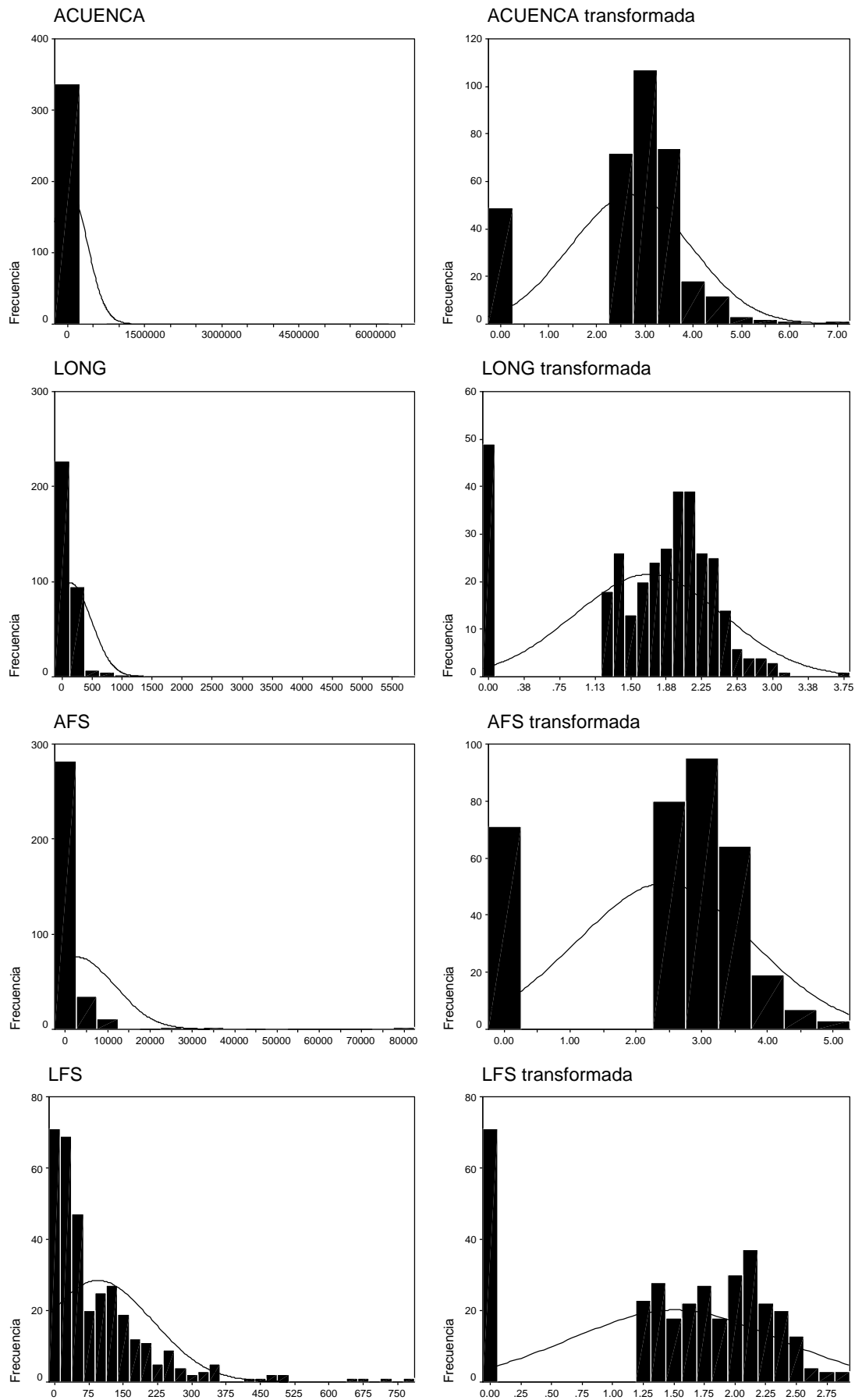


Figura 3.25: Histogramas de frecuencia con curva normal de las variables relativas a la cuenca y sus transformadas a logaritmo del área de Vallcebre.



FACTOR	EIGENVALUE	% DE LA VARIANZA	% ACUMULADO
1	3.849	24.055	24.055
2	3.143	19.641	43.696
3	2.482	15.510	59.206
4	1.776	11.101	70.307
5	1.332	8.325	78.632
6	1.039	6.491	85.123

Tabla 3.15: Varianza total explicada del Análisis Factorial de Componentes Principales (factores). Resultados de las sumas de las saturaciones al cuadrado de la rotación.

VARIABLES	COMUNALIDADES	VARIABLES	COMUNALIDADES
MDE	0.929	INSOL	0.854
PEND	0.956	PENDM	0.817
PENDS	0.899	FMS	0.880
ORIENT	0.882	VEG	0.803
CURVAR	0.981	ACUENCA	0.940
PERFIL	0.788	LONG	0.947
PLA	0.759	AFS	0.900
RUGOS	0.383	LFS	0.901

Tabla 3.16: Comunalidades o varianza total de cada una de las variables.

MATRIZ DE COMPONENTES ROTADOS (rotación Varimax)						
Variables	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6
MDE						0.958
PEND		0.964				
PENDS		0.926				
ORIENT					0.931	
INSOL		-0.855				
RUGOS						
CURVAR			0.946			
PERFIL			-0.863			
PLA	-0.450		0.737			
ACUENCA	0.934					
LONG	0.943					
AFS	0.841			0.408		
LFS	0.849					
PENDM	0.494	0.706				
VEG				0.743	-0.468	
FMS				0.892		

Tabla 3.17: Matriz con los pesos de las variables para cada uno de los 6 factores resultantes del Análisis Factorial con los valores mayores de 0.4. El método de rotación es la normalización Varimax con Kaiser. La rotación ha convergido en 7 iteraciones.

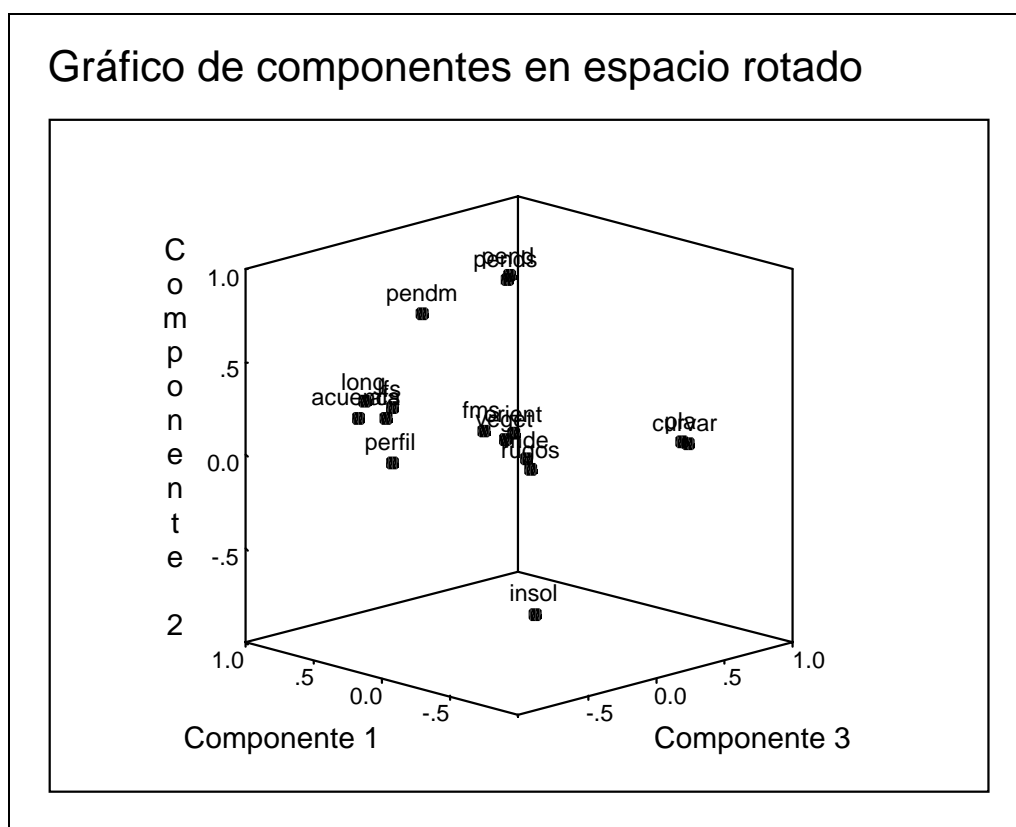


Figura 3.26: Proyección de las variables en un espacio tridimensional formado por los tres primeros factores del Análisis Factorial de Componentes Principales de la zona de Vallcebre.

### Relación entre las variables y la inestabilidad. Test T-test y One-Way

Los resultados del test-T y el One-Way (ver tabla 3.18) muestran la baja discriminación entre las poblaciones estable/inestable de las variables RUGOS y PLA. También se observa la elevada significación estadística de las variables relacionadas con la pendiente (PEND, PENDS y PENDM) así como de la orientación (ORIENT).

### Selección de las variables para el análisis discriminante

Las variables seleccionadas para el análisis discriminante se han escogido según los resultados de los análisis anteriores. Las variables excluidas para el análisis son RUGOS, PLA, ACUENCA y AFS. El resto de variables se ha introducido en el análisis combinadas separadamente con PEND y PENDS. La variable RUGOS en esta zona no se ha seleccionado por entender que no entraría en la función final.

### Análisis discriminante

Se ha aplicado el método por pasos para el análisis discriminante realizando varios análisis con distintas combinaciones de variables y con PEND y PENDS por separado. En la tabla 3.19 se muestran algunas de estas combinaciones. La función seleccionada final y sus parámetros estadísticos se muestran en la tabla 3.20. Los valores discriminantes oscilan entre  $-3.5$  y  $2.75$  con centroides en  $-0.69$  para la población estable y  $0.763$  para la inestable. El porcentaje de casos correctamente clasificados es de  $77.7\%$  para un índice discriminante de  $DF = 0.0$ . Los controles estadísticos de la función (Lambda de Wilks, autovalor, etc) nos



indican que se trata de una función similar a la obtenida en la zona de La Pobra con un poder discriminante menor para separar las dos poblaciones. En la figura 3.27 se muestran los histogramas por separado con las poblaciones estable inestable según la función discriminante. Como se puede observar la variable PENDS es la más discriminante con un peso de 0.658 seguida por la variable LFS con -0.509 y la PENDM con 0.473. A éstas les siguen las variables FMS, MDE, LONG, INSOL, ORIENT y VEGET con pesos inferiores. Como en el caso de La Pobra de Lillet los valores discriminantes positivos favorecen la inestabilidad y los negativos la estabilidad.

T-TEST			ONE-WAY		T-TEST			ONE-WAY	
Variable (grupo)	Media	Desviación estándar	F	Sig.	Variable (grupo)	Media	Desviación estándar	F	Sig.
MDE	ST	1269.3	6.55	0.011	PLA	-0.04	1.2	1.9	0.163
	IN	1193.8			IN	-0.22			
PEND	ST	20.5	81.58	0.000	ACUENCA	2.5	1.5	8.5	0.004
	IN	31.3			IN	2.9			
PENDS	ST	0.6	86.72	0.000	LONG	1.5	0.9	12.6	0.000
	IN	0.8			IN	1.8			
ORIENT	ST	76.3	46.8	0.000	AFS	2.2	1.5	5.5	0.019
	IN	115.6			IN	2.6			
INSOL	ST	143.1	15.8	0.000	LFS	1.3	0.9	6.79	0.010
	IN	137.2			IN	1.6			
RUGOS	ST	0.991	0.729	0.394	PENDM	17.8	13.1	81.6	0.000
	IN	0.993			IN	30.9			
CURVAR	ST	-0.05	6.5	0.011	VEGET	11.8	4.46	3.8	0.050
	IN	-0.68			IN	10.9			
PERFIL	ST	-0.01	8	0.005	FMS	3.60	1.03	8.554	0.004
	IN	0.45			IN	3.87			

Tabla 3.18: Resultados del test T-Test para las variables que caracterizan la ladera y del test One.Way de varianzas múltiples (ST: celdas estables; IN: celdas con roturas). En el test T-test las variables con media y desviación estándar distinto entre las dos poblaciones (estable y con roturas) presentan alto poder discriminante entre ellas. En el test One-way altos valores de F indican que la variable discrimina entre las dos poblaciones.

Según los resultados de la función al aumentar las pendientes de las laderas y pendientes medias de las cuencas, orientaciones sur, longitudes de cuenca elevadas y presencia de formación superficial favorecen la inestabilidad. El aumento de insolación de una zona hace aumentar también la inestabilidad de la ladera. Vegetación densa, altitudes bajas y longitudes de cuenca elevadas de la formación superficial favorecen la estabilidad.

FE	FS	N°	$\lambda$	% R	% S	% T	VAR. DE LA FUNCIÓN	VAR. EXCLUIDAS
3.84	2.71	5	.687	70.6	78.5	74.8	PEND+, PENDM+, INSOL+, ORIENT+, MDE-	LONG, LFS, FMS, CURVAR, VEGET, RUGOS
1	0	9	.675	70.6	81.4	76.3	PEND+, PENDM+, LFS-, FMS+, INSOL+, MDE-, ORIENT+, VEGET-, LONG+	PERFIL, CURVAR, RUGOS
2	1	6	.668	72.5	79.1	76.0	PENDS+, PENDM+, MDE-, ORIENT+, INSOL+, LFS-	LONG, PERFIL, FMS,CURVAR, VEGET, RUGOS
1	0	9	.654	76.9	78.5	77.7	PENDS+, LFS-, PENDM+, FMS+, MDE-, LONG+, INSOL+, ORIENT+, VEGET-	PERFIL, CURVAR, RUGOS

Tabla 3.19: Resultados de algunas de las distintas funciones discriminantes obtenidas con las variables seleccionadas para el análisis discriminante (FE: F de entrada que limita las variables que entran en la función incluyéndose aquéllas con valor de F mayor que el fijado; FS: F de salida que excluye las variables con valor inferior a este F establecido; N°: número de pasos de la función y por tanto de variables incluidas;  $\lambda$ : lambda de wilks, estadístico de control de la bondad de la función; % R: porcentaje de acierto de las celdas con roturas; % S: porcentaje de acierto de las celdas sin roturas; % T: porcentaje de acierto total; Var.: variables). La función seleccionada se muestra remarcada.

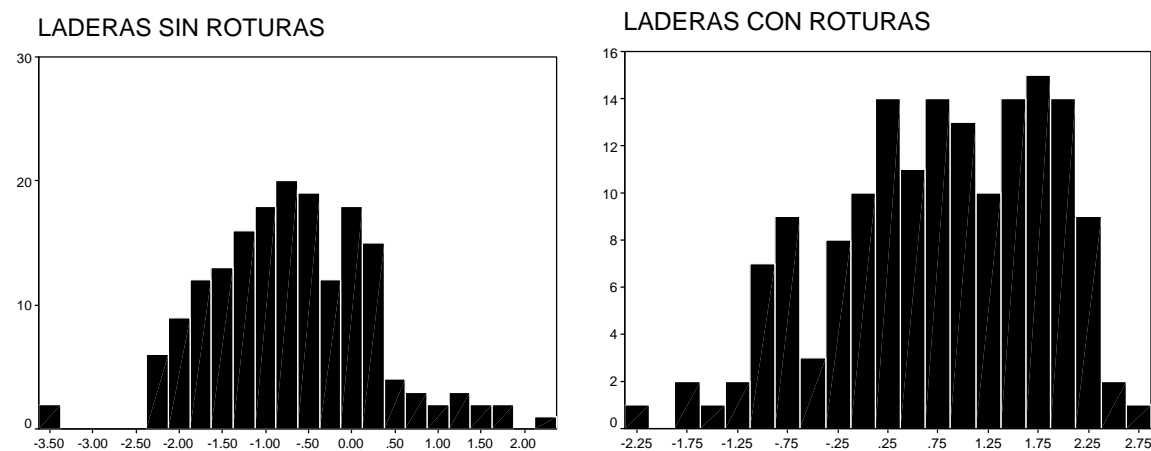


Figura 3.27: Histogramas de frecuencias con los valores de la función discriminante seleccionada en Vallcebre, para la muestra utilizada, con las dos poblaciones por separado (laderas con y sin roturas). Obsérvese el valor  $F = 0$  que separa las dos poblaciones según la función, indicando los valores positivos laderas inestables y los negativos laderas estables.

Las variables incluidas en la función son casi las mismas que las de la zona de La Pobra de Lillet exceptuando LFS, INSOL, ORIENT y PLA. Si consideramos que PEND y PENDS son la misma variable, y la variable FMS es una simplificación de GROSOR, las dos funciones obtenidas coinciden en 6 variables: pendiente de la ladera, pendiente media de la cuenca, existencia de formación superficial o espesor de ésta, altitud, vegetación y longitud de la cuenca. En la zona de Vallcebre la orientación de la ladera respecto al sol es un factor importante como demuestran las dos variables incluidas en la función INSOL y ORIENT. Cabe pensar que quizás la orientación muestre la importancia del avance de los frentes de lluvia. De la misma manera la longitud de la cuenca del área ocupada por la formación

superficial (LFS), remarcando la importancia de la existencia de estos depósitos, influye en la estabilidad de las laderas. En Vallcebre las variables relacionadas con la convexidad y concavidad de la ladera han sido excluidas de la función final.

Los resultados obtenidos en Vallcebre, corroboran algunos de los obtenidos por Baeza (1994) exceptuando las variables relativas a la orientación, la convexidad / concavidad y, como en el caso de La Pobla de Lillet, la altitud. En Vallcebre la elevación también se relaciona con la litología de forma que ciertas litologías (calizas y calcarenitas del Cretácico superior), que se encuentra en áreas elevadas como la Sierra de Ensija y laderas sur de la Sierra del Cadí, no presentan depósitos superficiales, o estos son muy escasos, reduciéndose drásticamente la susceptibilidad a producir roturas.

VARIABLES	COEFICIENTES DE LA FUNCIÓN	
	Estándarizados	No estandarizados
PENDS	0.658	3.030
LFS	-0.509	-0.616
PENDM	0.473	0.035
FMS	0.374	0.441
MDE	-0.328	-0.001
LONG	0.311	0.407
INSOL	0.293	0.022
ORIENT	0.286	0.005
VEG	-0.245	-0.057
constant		-5.829

EIGENVALUE	WILKS-λ	χ <sup>2</sup>	PROB. %	CLASIFICACION (F = 0)
0.530	0.654	140.55	0.000	General 77.7 % Parcial (estable/inestable) 78.5% / 76.9%

Tabla 3.20: Resultados de la función discriminante del área de Vallcebre.

### Mapa de susceptibilidad , validación y comprobación de los resultados

El mapa de susceptibilidad resultante del análisis se muestra en la figura 3.28. La validación de la predicción del mapa se realizó con el resto de celdas de la malla regular no utilizadas para el análisis. En la tabla 3.21 se muestran los resultados del índice de densidad relativa utilizado. Los valores del índice aumentan al aumentar el nivel de susceptibilidad. El nivel de susceptibilidad baja presenta 14 deslizamientos, aunque hay que observar que es el mayor nivel, en cuanto a área se refiere (39.8 % del área total).

En Vallcebre se han comprobado los datos de las 217 celdas del nivel más susceptible (ver tabla 4 con los valores de las variables sin transformar de la función en el Anejo 3). En esta tabla destaca la existencia de 95 celdas con valores de PEND superiores a 45°, correspondiendo al 43.7 % del nivel, de las cuales 11 pertenecen a substrato rocoso. Aunque la función ha utilizado la variable PENDS, que como se ha visto en la Pobla de Lillet ayuda a reducir este error, parece, en un primer momento, que en el caso de Vallcebre no ha tenido mucho éxito. Los resultados de Vallcebre se comprenden al observar que una buena parte de las celdas con roturas (ver figura 1 en el Anejo 3) tienen valores de PEND muy elevados

debidos tanto a la imprecisión como a la resolución del MDE utilizado. Esto hace que sean valores más altos de la pendiente de la ladera los que indican rotura. Este error, que como se verá en el Capítulo 6 de la memoria, no se puede enmendar, viene acompañado de la existencia de algunas celdas con substrato rocoso (31) que bien pueden ser errores de la transformación a formato raster o bien de digitalización. También se puede comprobar que la mayor parte de las celdas tienen valores de la variable LFS (longitud de la cuenca ocupada por la formación superficial) 0 indicando cabecera de cuenca de la formación superficial, aspecto que se puede observar en el paisaje. La variable PENDM presenta valores muy altos que corresponden a celdas de laderas con pendientes medias y cercanas a la cabecera de cuenca.

<b>ÍNDICE DE DENSIDAD RELATIVA</b>			
<b>Nivel de susceptibilidad</b>	<b>Nº de mov.</b>	<b>Nº de celdas</b>	<b>Índice</b>
<b>Muy baja</b>	0	521	0.000
<b>Bastante baja</b>	0	16669	0.000
<b>Baja</b>	14	86302	1.540
<b>Moderada</b>	42	73377	5.435
<b>Alta</b>	53	32101	15.677
<b>Bastante alta</b>	27	7632	33.591
<b>Muy alta</b>	1	217	43.757

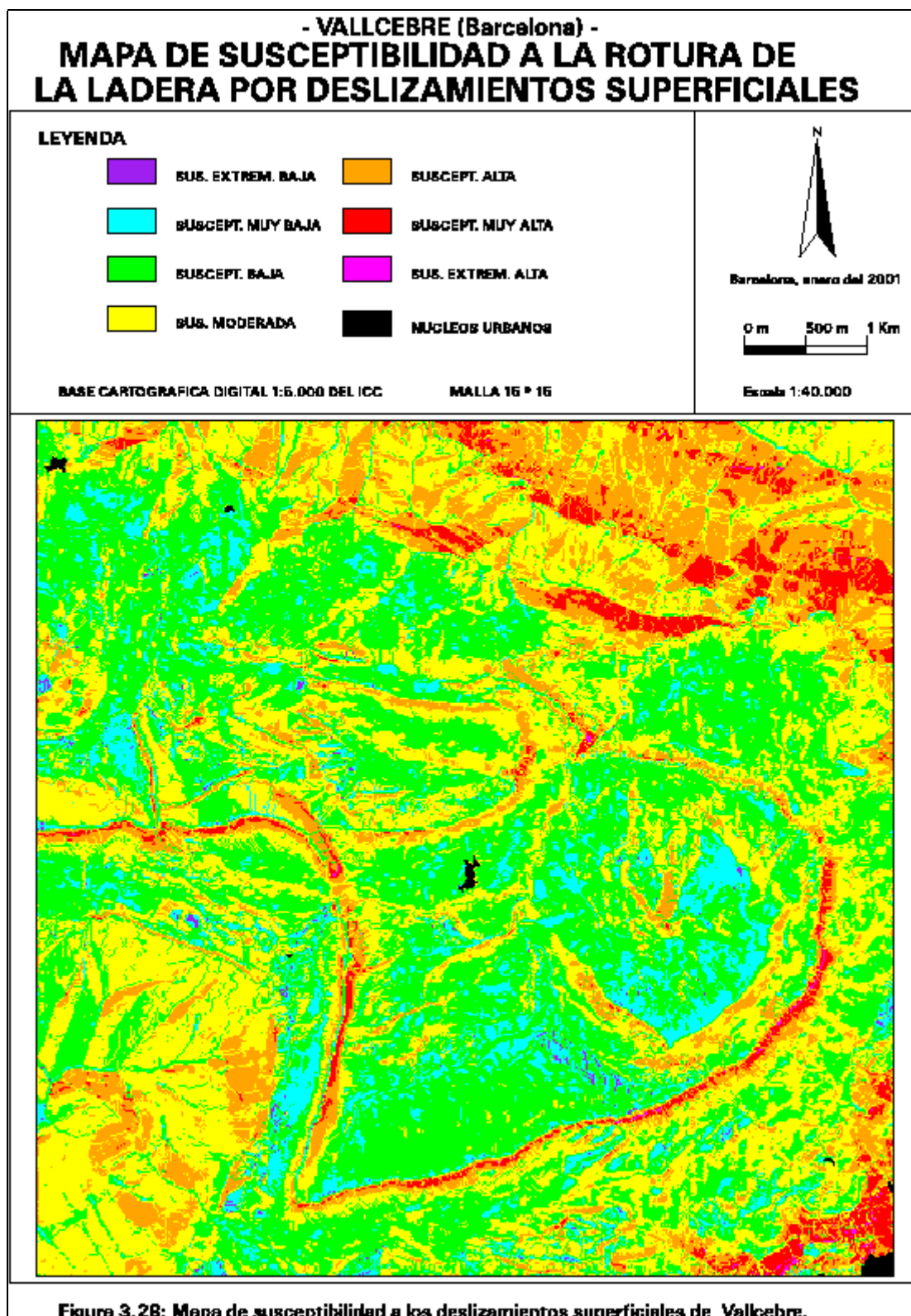
Tabla 3.21: Resultados del índice de densidad relativa aplicado al resto de celdas no utilizadas para el análisis en la zona piloto de Vallcebre.

En conclusión, en Vallcebre también se han encontrado errores que se supone pueden existir en los restantes niveles de susceptibilidad, aunque cabe esperar que una buena parte de las celdas presentan una estimación de la susceptibilidad que se puede considerar correcta.

### **3.3.5. APLICACIÓN AL BAJO DEBA**

El procedimiento descrito en detalle en el Anejo 3 y desarrollado, con menor detalle en el apartado de La Pobla de Lillet, se ha aplicado a una pequeña área del valle inferior del río Deba (Guipúzcoa) conocida como el Bajo Deba. Como en el caso del área de Vallcebre se presentan los resultados del análisis y se comentan las particularidades del procedimiento que se han aplicado en esta área.

El objetivo de la aplicación del procedimiento en una tercera área es doble: por una parte se intenta responder la cuestión de hasta qué punto el procedimiento es extrapolable a otras zonas con deslizamientos superficiales, utilizando las mismas variables utilizadas hasta el momento. Por otra parte la extrapolación y la aplicación del procedimiento es interesante comprobarla en un contexto morfoclimático distinto a las dos áreas anteriores. En este sentido el área del Bajo Deba cumple los requisitos necesarios amén de disponer de la información necesaria (el MDE y la información digitalizada sobre la vegetación, existencia de formación superficial y espesor de ésta y el inventario de la zona de rotura de deslizamientos de tipo superficial). Cabe destacar que los deslizamientos superficiales del Bajo Deba presentan tipologías similares a los de las áreas de La Pobla de Lillet y Vallcebre, pero con



características distintas en cuanto a las dimensiones de las zonas de rotura de los deslizamientos, bastante más grandes. Los deslizamientos inventariados no corresponden a un único episodio lluvioso, si no a un inventario de los últimos 40 años en la zona.

El tamaño de la malla regular es de 15 \* 15 metros. Para la zona del Bajo Deba se han utilizado las mismas variables que para la zona de La Pobra de Lillet. Las variables derivadas del Modelo Digital de Elevaciones son las mismas y se obtienen de los archivos AML femask.aml y fegril.aml. Estas variables son: PEND, PENDS, ORIENT, PENDM, ACUENCA, LONG, AFS, LFS, CURVAR, PERFIL, PLA, RUGOS y INSOL. La función o interpretación de estas variables en la zona del Bajo Deba es la misma ya comentada para la zona de la Pobra de Lillet. En el Anejo 2 se pueden observar estas variables.

Las variables cualitativas del Bajo Deba son GROSOR y VEGET (consúltese el Anejo 2), variables que se encuentran en formato vectorial, al igual que ocurre con la variable MOV con los puntos de la zona de rotura de los deslizamientos. La interpretación de cada una de estas variables es similar a la utilizada para la zona de La Pobra de Lillet, teniendo en cuenta las particularidades de cada zona. En la figura 3.29 se muestra la distribución de los deslizamientos en el área.

Lo mismo cabe decir para el caso de la variable MDE. El único comentario al respecto, es el uso del modelo digital sin rellenar (MDE no MDEFILL) para derivar las variables y para realizar el análisis estadístico. En la zona del Bajo Deba se ha creído conveniente no trabajar con el modelo de elevaciones relleno puesto que la geología del área presenta zonas cársticas con depresiones típicas del relieve, que no deben ser eliminadas.

Es esta zona, como en el caso de la Pobra de Lillet, se han manipulado y categorizado algunas variables para entrarlas en el análisis estadístico.

## **Ajuste y ponderación de las variables**

### **Ajuste**

Se han realizado los mismos ajustes para las variables ACUENCA, LONG, AFS, LFS, y PENDS descritas previamente en el área de La Pobra de Lillet. La variable RUGOS se ha utilizado directamente sin ajustar el efecto borde dado que en análisis previos se observa que no modifica los resultados del análisis. La variable ORIENT que en el caso de La Pobra de Lillet y Vallcebre se transformó a valores de 0° a 180° resaltando las orientaciones Norte-Sur para poder entrarla en el análisis, se ajusta en el caso del Bajo Deba priorizando las orientaciones Este-Oeste. El ajuste se lleva a cabo debido al relieve de la zona con valles que presentan orientaciones Norte-Sur estando la mayor parte de las laderas orientadas Este-Oeste. La nueva variable se crea con el archivo AML ORI90.AML que se puede consultar en el Anejo 1.

### **Ponderación**

Las variables cualitativas han sido ponderadas para el análisis discriminante según criterio experto sobre la zona de estudio a la que pertenecen.

GROSOR : Como en el caso de la Pobra de Lillet y Vallcebre, la ponderación se ha realizado en base a la frecuencia relativa de las categorías en relación a la distribución de los deslizamientos. Los valores crecen de menos a más favorable a la inestabilidad.

SIGNIFICADO	PONDERACIÓN
Roquedo	1
0-0.5 m espesor	2
> 0.5 m espesor	8

VEGETACION : Esta variable, como en el caso de La Pobla de Lillet, se ha ponderado con valores que reflejan un orden relativo a la capacidad de infiltración del agua de lluvia y fijación de terreno por la cobertera vegetal. Los valores aumentan desde la situación más favorable a la inestabilidad hasta la menos favorable.

SIGNIFICADO	PONDERACION
Bosque muy denso de frondosas	15
Bosque denso de frondosas	14
Bosque semiabierto de frondosas	12
Bosque muy denso de coníferas (repobl. forestal)	14
Matorral	9
Prados, pastos y cultivos	6
Zonas sin vegetación (urbana, roquedo, etc.)	1

### Test de Normalidad y transformación de algunas variables

Una vez obtenida la muestra al azar con la mitad de las celdas con roturas y un número similar de celdas estables (ver la figura 3. 30) se lleva ésta al paquete estadístico SPSS para iniciar el análisis estadístico.

En las figuras 3.31 y 3.32 se observan los histogramas de las variables derivadas del MDE. En la tabla 3. 22 se muestran los resultados del test de Kolmogorov-S.

Como se puede observar en los histogramas hay algunas variables que independientemente de la zona de estudio, presentan una distribución típica. Las variables mencionadas son ACUENCA, LONG, AFS, y LFS con sesgo positivo muy marcado, la variable RUGOS con sesgo negativo también muy marcado y la variable PENDM con un pico en los valores bajos de la población.

Las variables CURVAR y PERFIL muestran una distribución casi normal con algunos casos extremos y un pico en los valores centrales, pico que también aparece en la variable PLA (curvatura en la dirección perpendicular a la máxima pendiente) con una distribución un poco más alejada de la norma. La variable ORI90 presenta una distribución bimodal con una población importante para los valores bajos (orientaciones Oeste) y una población mucho más reducida para los valores altos (orientaciones Este).

El resto de variables, MDE, PEND, PENDS y INSOL presentan distribuciones que se acercan a la curva normal con algunos valores extremos o con tendencia a sesgado en algunas de ellas.

- AREA DEL BAJO DEBA (Guipuzcoa) -

# INVENTARIO DE MOVIMIENTOS SUPERFICIALES

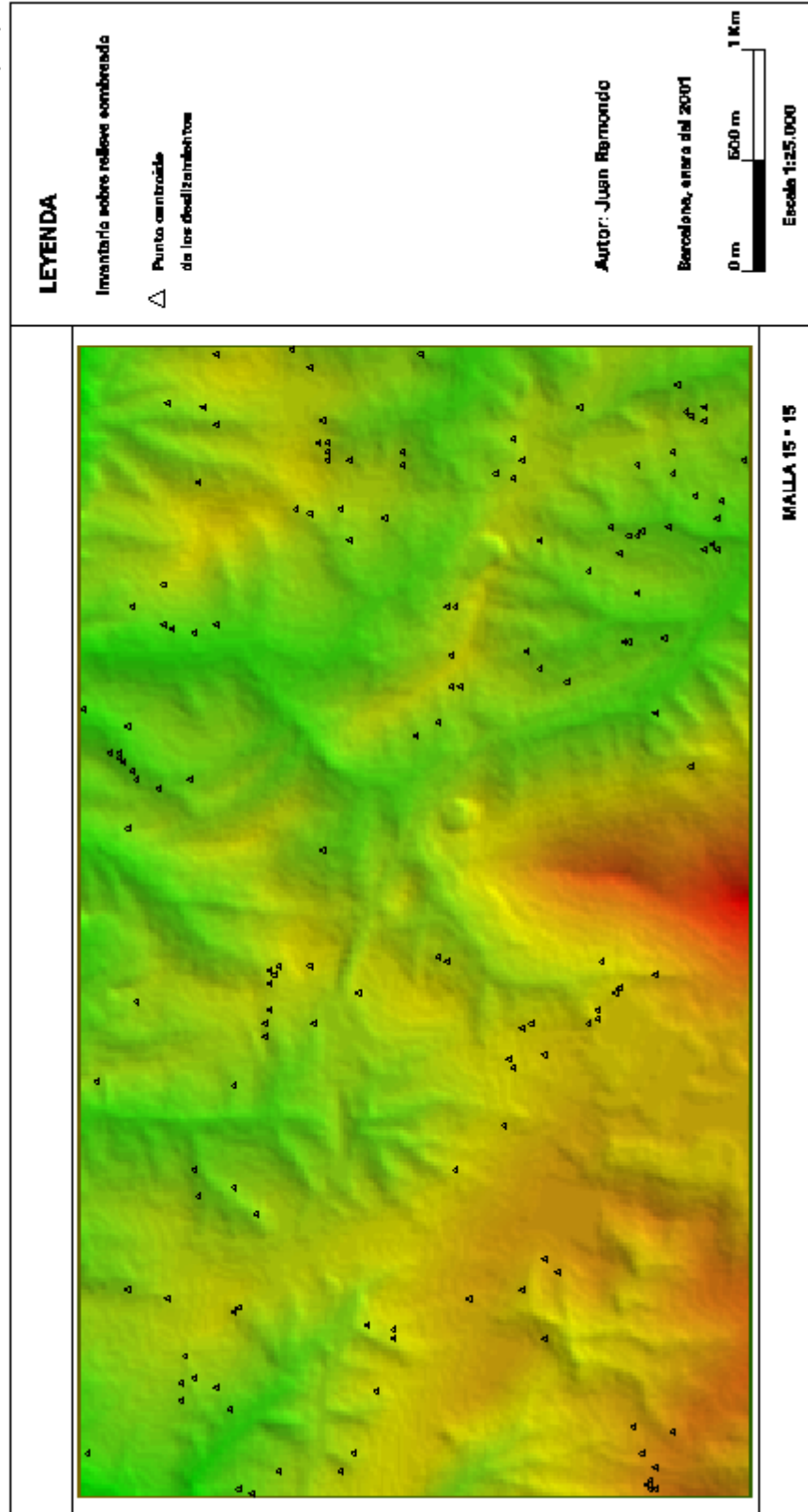


Figure 3.28: Mapa del inventario de los deslizamientos superficiales (centroides de la zona de rotura) del Bajo Deba.



Variables	Sin transformación		Con transformación (log <sub>10</sub> )	
	Z de K-S	Sig. asintótica	Z de K-S	Sig. Asintótica
MDE	1.427	0.034		
PEND	0.758	0.614		
PENDS	1.226	0.099		
ORIENT	2.136	0.000		
INSOL	1.733	0.005		
RUGOS	5.337	0.000		
CURVAR	1.094	0.183		
PERFIL	0.997	0.273		
PLA	1.113	0.168		
ACUENCA	5.149	0.000	3.580	0.000
LONG	3.307	0.000	2.470	0.000
AFS	5.151	0.000	3.562	0.000
LFS	3.219	0.000	2.516	0.000
PENDM	2.216	0.000		

Tabla 3.22: Resultados del Test de normalidad (K-S Z) de las variables tanto sin transformar como de las transformadas y su significancia.

Como en el caso de La Pobla de Lillet y Vallcebre las variables ACUENCA, LONG, AFS, y LFS se transforman con la función LOG10 para reducir el sesgo positivo, aunque la transformación no mejor mucho en el caso de LONG y LFS. La variable RUGOS no se va a transformar para reducir el sesgo negativo, dado que la transformación prácticamente no favorece la normalidad de la variable.

Los histogramas de las variables transformadas ACUENCA, LONG, AFS y LFS presentan una distribución bimodal, similar a la de la variable PENDM con un pico en los valores bajos de las variables.

### Dependencia entre variables. Análisis factorial.

Para conocer la dependencia entre las variables en la zona del Bajo Deba se realiza el Análisis Factorial de Componentes Principales. Los resultados del análisis Factorial muestran la dependencia entre las variables ACUENCA, LONG, AFS y LFS por un lado, PEND y PENDS por otro y CURVAR con PERFIL y PLA respectivamente (ver tabla 3.23).

El análisis factorial mostró cinco factores resultantes representando un 63.6 % del total de la varianza si se consideran los tres primeros factores, alcanzando un 80.2 % si se consideran los cinco resultantes (ver tabla 3.24).

En la tabla 3.25 se observa que la varianza total de cada una de las variables explicadas por los cinco factores (comunalidad) supera el 75 % exceptuando las variables MDE, ORIENT, GROSOR y VEGET. Las variables mejor representadas son ACUENCA, LONG, AFS y LFS con más del 98 % de la varianza.



—AREA DEL BAJO DEBA (Guipuzcoa) —

### MUESTRA ALEATORIA UTILIZADA

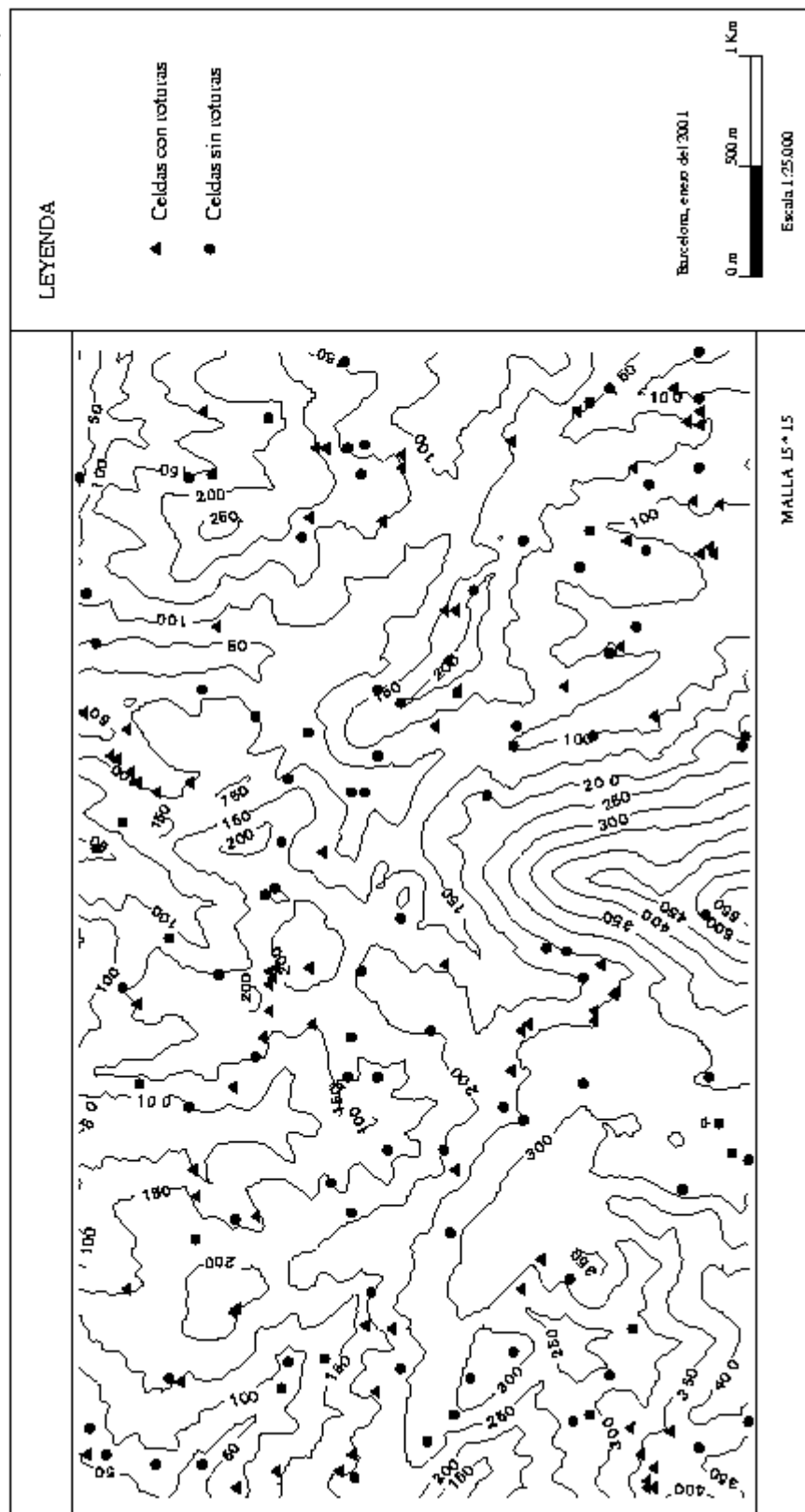


Figura 3.30: Mapa del area del Bajo Deba con la muestra aleatoria seleccionada utilizada en el analisis.

FACTOR	EIGENVALUE	% DE LA VARIANZA	% ACUMULADO
1	4.818	30.116	30.116
2	2.980	18.628	48.744
3	2.383	14.896	63.639
4	1.457	9.105	72.744
5	1.195	7.467	80.211

Tabla 3.24: Varianza total explicada del Análisis Factorial de Componentes Principales (factores). Resultados de las sumas de las saturaciones al cuadrado de la rotación.

VARIABLES	COMUNALIDADES	VARIABLES	COMUNALIDADES
MDE	0.576	INSOL	0.759
PEND	0.940	PENDM	0.815
PENDS	0.900	GROSOR	0.272
ORIENT	0.630	VEGET	0.464
CURVAR	0.984	ACUENCA	0.992
PERFIL	0.904	LONG	0.989
PLA	0.833	AFS	0.992
RUGOS	0.793	LFS	0.989

Tabla 3.25: Comunalidades o varianza total de cada una de las variables.

En la tabla 3.26 (tabla de saturaciones) se listan los factores con el peso de cada una de las variables. El primer factor que explica el 30 % de la varianza total de la muestra, está representado por las variables relativas a la cuenca (ACUENCA, LONG, AFS, LFS y PENDM) con una representación inferior de las variables referentes a la curvatura (PLA, y CURVAR). Como en las otras zonas, este factor expresa la capacidad de converger mayor o menor cantidad de agua hacia la zona potencial de rotura. En la matriz de correlaciones (ver tabla 3.23) se observan las altas correlaciones entre las variables principales representadas por el factor.

El segundo factor que explica un 18.6% de la varianza total está representado por las variables PEND, PENDS y INSOL16, y en menor medida por PENDM. Este factor trata de expresar la influencia de la pendiente y la orientación de la ladera respecto al sol. En la matriz de correlaciones (ver tabla 3.23) se observa la alta correlación entre PEND y PENDS siendo la correlación con INSOL16 de 0.7. El tercer factor que explica un 14.8 % de la varianza total está representado por las variables relativas a la curvatura de la ladera (PERFIL, CURVAR y PLA). El factor recoge parte de la morfología de la ladera que expresa a través del grado de convexidad o concavidad de la misma en diversas secciones. Como se observa en la matriz de correlaciones de la tabla 3.23 las tres variables que representan curvatura están correlacionadas más de un 0.8 a excepción de las variables PERFIL y PLA entre sí, debido a que explican cosas distintas (curvatura en la dirección de máxima pendiente y en la dirección transversal a la máxima pendiente, respectivamente).

El cuarto factor con un 9 % de la varianza total está representado por la elevación y en proporción menor por las variables ORIENT, VEGET y GROSOR. El factor expresa la influencia de la elevación en el tipo y densidad de vegetación y en el grosor de la formación superficial condicionada su vez por la orientación de la ladera. El quinto factor con un 7.4 % de la varianza total está representado por las variables RUGOS y en menor proporción por ORIENT. Este factor indica la morfología del relieve expresada en términos de relieve liso, con pocos accidentes o rugoso y accidentado, con cambios de direcciones, ángulos de la pendiente etc.

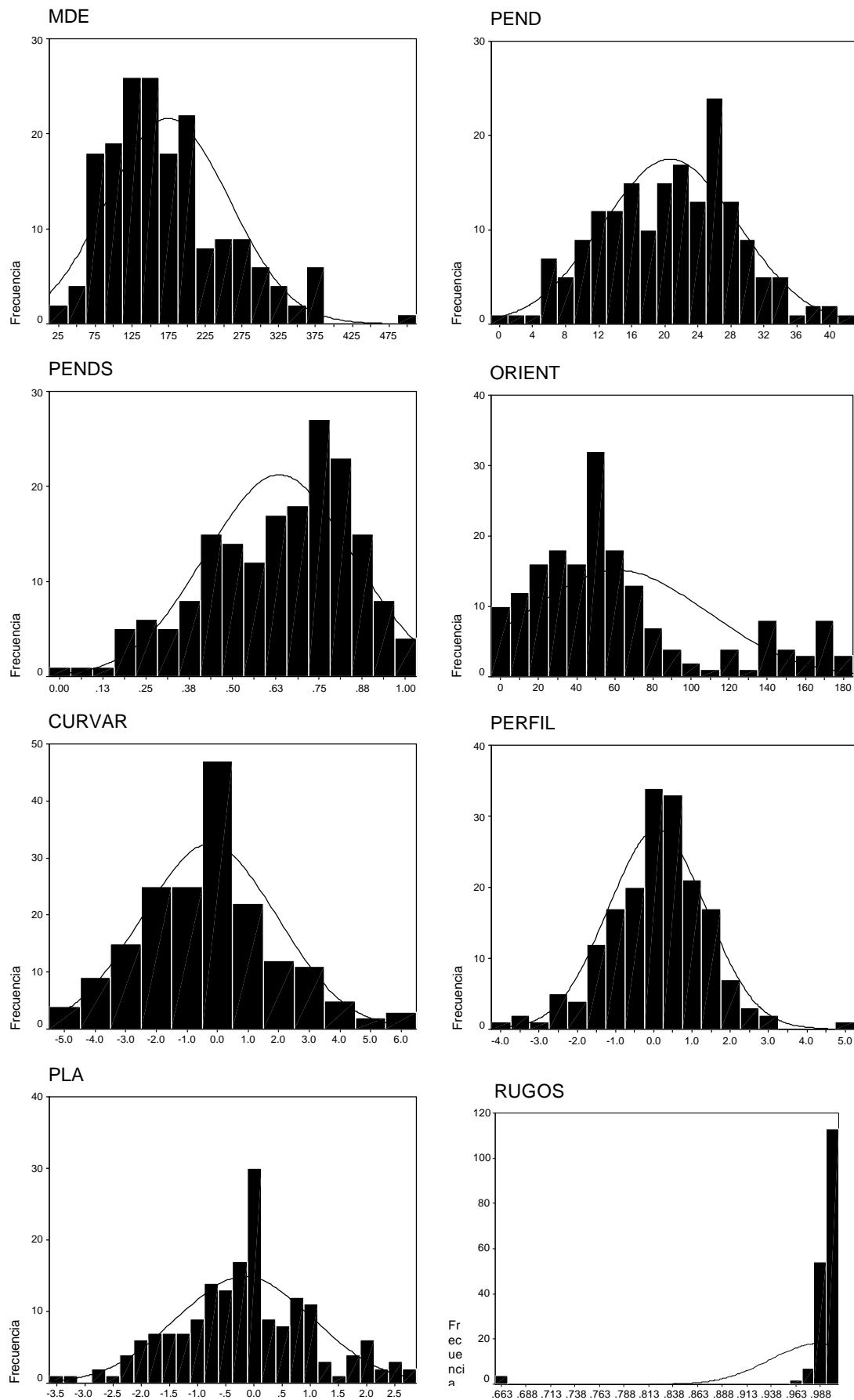


Figura 3.31 : Histogramas de frecuencia con curva normal de algunas de las variables derivadas del MDE y de las variables categóricas de la zona del Bajo Deba.

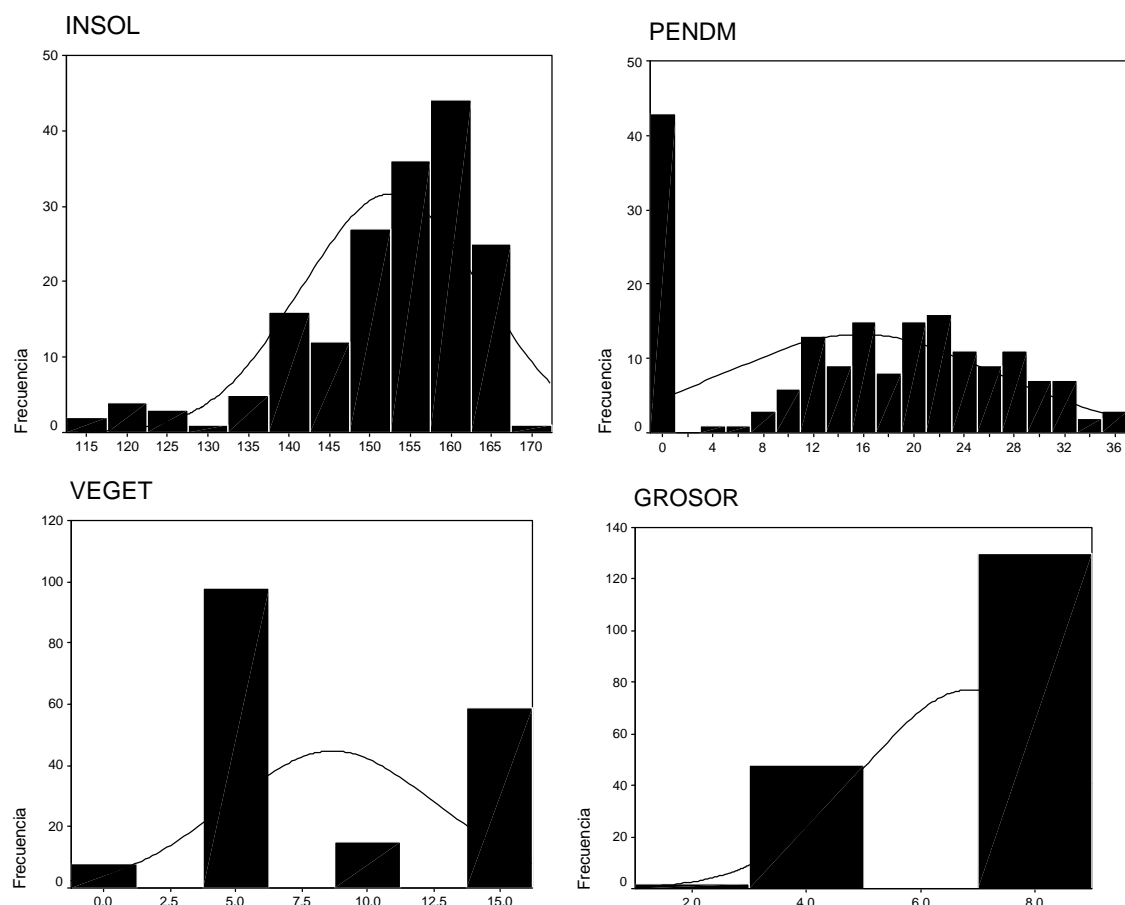


Figura 3.31 (continuación): Histogramas de frecuencia con la curva normal de algunas de las variables derivadas del MDE y las variables categóricas de la zona del Bajo Deba.

<b>VARIMAX ROTATED FACTOR MATRIX</b>					
Variables	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5
MDE				-0.724	
PEND		0.944			
PENDS		0.923			
ORIENT				0.568	0.537
INSOL		-0.852			
RUGOS					0.861
CURVAR	-0.423		-0.892		
PERFIL			0.921		
PLA	-0.564		-0.672		
ACUENCA	0.974				
LONG	0.975				
AFS	0.974				
LFS	0.975				
PENDM	0.668	0.553			
VEGET				0.513	
GROSOR				-0.443	

Tabla 3.26: Matriz con los pesos de las variables para cada uno de los 5 factores resultantes del Análisis Factorial con los valores mayores de 0.4. El método de rotación es la normalización Varimax con Kaiser. La rotación ha convergido en 7 iteraciones.

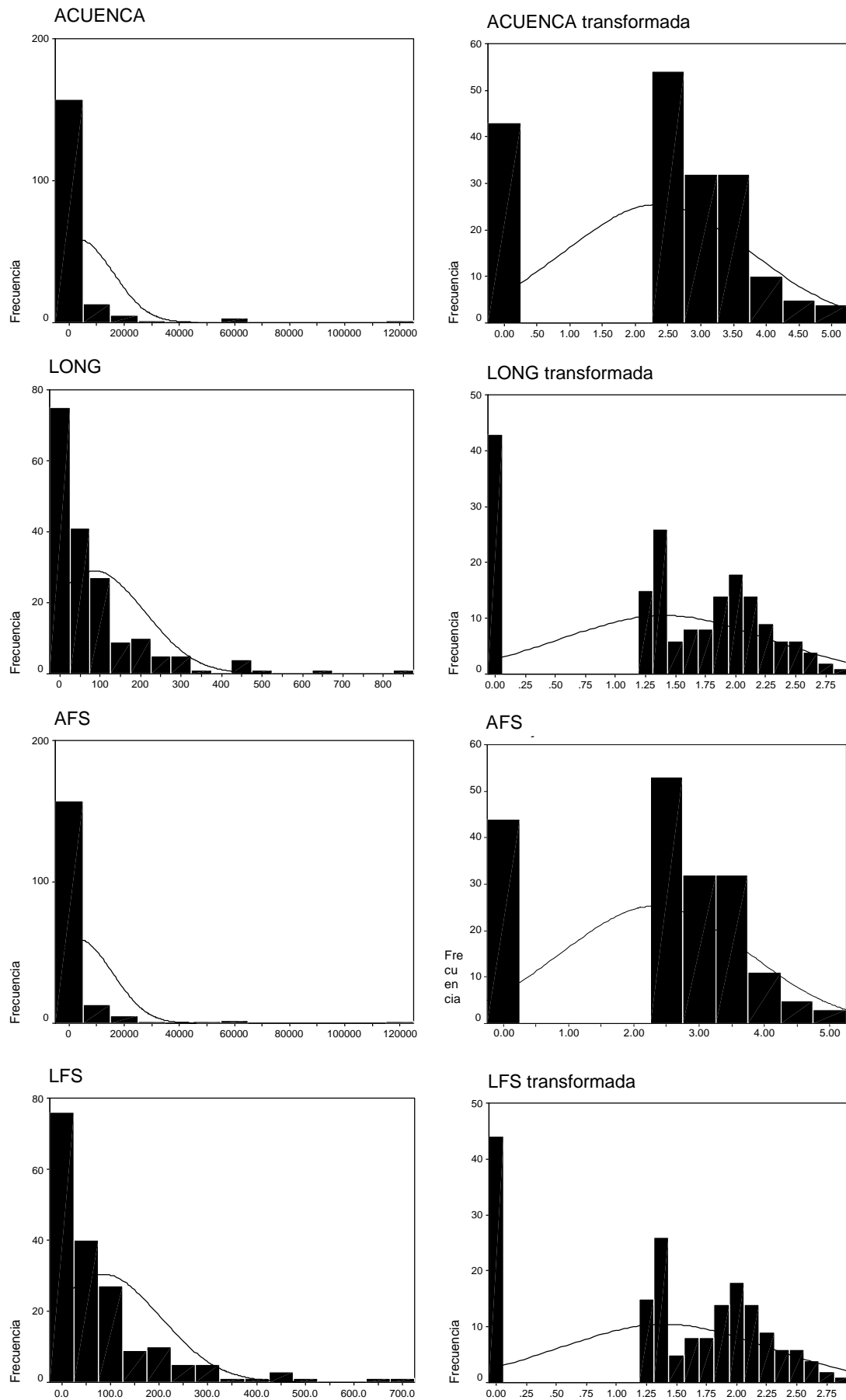


Figura 3.32: Histogramas de frecuencia con curva normal de las variables relativas a la cuenca y sus transformadas a logaritmo del área del Bajo Deba.



### Relación entre las variables y la inestabilidad. Test T-Test y One-Way.

Los resultados del test-T y el One-Way (ver la tabla 3.27) muestran la baja discriminación entre las poblaciones estable/inestable de gran parte de las variables utilizadas. La elevación y las variables referidas a la cuenca no discriminan entre las dos poblaciones. Las variables referidas a la pendiente de la ladera son las que presentan el poder discriminante mayor. A éstas les siguen, a bastante distancia, las variables INSOL, RUGOS, VEG y las relativas a la curvatura (PERFIL y CURVAR).

T-TEST				ONE-WAY		T-TEST				ONE-WAY	
Variable (grupo)	Media	Desviación estándar	F	Sig.	Variable (grupo)	Media	Desviación estándar	F	Sig.		
MDE	ST	175.7	85	0.04	0.842	PLA	ST	-0.07	1.1	1.2	0.272
	IN	173.2	80.6			IN	-0.27	1.2			
PEND	ST	18.5	8.7	15.7	0.000	ACUENCA	ST	2.2	1.5	0.86	0.355
	IN	23.2	6.6			IN	2.4	1.2			
PENDS	ST	0.57	0.22	19.1	0.000	LONG	ST	1.3	0.9	0.76	0.38
	IN	0.7	0.16			IN	1.4	0.7			
ORIENT	ST	56.3	48.1	2.4	0.122	AFS	ST	2.2	1.5	1.1	0.295
	IN	67.3	46.1			IN	2.4	1.2			
INSOL	ST	154.1	10.9	3.86	0.051	LFS	ST	1.3	0.9	0.98	0.321
	IN	150.8	11			IN	1.4	0.7			
RUGOS	ST	0.97	0.06	3.68	0.057	PENDM	ST	14.6	11.3	2.0	0.159
	IN	0.99	0.005			IN	16.9	10			
CURVAR	ST	-0.009	2.2	2.72	0.100	VEGET	ST	9.1	4.4	3.2	0.075
	IN	-0.55	2.1			IN	8.0	3.3			
PERFIL	ST	-0.07	1.3	3.3	0.07	GROSOR	ST	6.9	1.8	1.679	0.197
	IN	0.27	1.2			IN	6.7	1.8			

Tabla 3.27: Resultados del test T-Test para las variables que caracterizan la ladera y del test One.Way de varianzas múltiples (ST: celdas estables; IN: celdas con roturas). En el test T-test las variables con media y desviación estándar distinto entre las dos poblaciones (estable y con roturas) presentan alto poder discriminante entre ellas. En el test One-way altos valores de F indican que la variable discrimina entre las dos poblaciones.

### Selección de las variables para el análisis discriminante

A partir de los resultados obtenidos se han seleccionado las variables que entrarán en el análisis discriminante.

De las variables que mostraban una mayor correlación entre sí, según la matriz de correlaciones, se ha escogido aquella con un F mayor en el test ONEWAY. Esto ocurre con las variables ACUENCA, LONG, AFS y LFS de las que sólo una ha sido seleccionada para el análisis discriminante. El criterio utilizado se basa en el resultado del Test ONEWAY, seleccionando la variable con F mayor que, en este caso, es AFS. Lo mismo ocurre con las



variables PEND y PENS que están estrechamente correlacionadas. Debido al alto poder discriminante de ambas variables se realizará el análisis utilizándolas cada una por separado con el resto de variables, como se ha realizado en La Pobra de Lillet y Vallcebre. Habida cuenta del bajo poder discriminante de las variables en general, son seleccionadas las tres referidas a la curvatura del terreno (CURVAR, PERFIL y PLA) pese a la correlación existente entre CURVAR y las otras dos.

Se ha desestimado el MDE dado que tanto en el test T como en el One-Way presentaba un poder discriminante muy bajo entre las dos poblaciones (estable/inestable).

Las variables seleccionadas para el análisis discriminante son pues: ORI90, PLA, PERFIL, RUGOS, PENDM, INSOL, VEGET, GROSOR y AFS combinadas separadamente con PEND y PENS.

### **Análisis discriminante**

El análisis discriminante se ha realizado con las variables PEND y PENS por separado, combinadas con las otras variables seleccionadas. Los mejores resultados se han obtenido con la variable PENS. Pese a ello los resultados son mediocres teniendo en cuenta que los análisis previos sobre la relación de las variables con la estabilidad ya nos advertían de la baja discriminación de las variables.

La función seleccionada final y sus parámetros estadísticos se muestran en la tabla 3.28. Los valores discriminantes oscilan entre  $-3.5$  y  $2.75$  con centroides en  $-0.475$  para la población sin roturas y  $0.544$  con roturas. Los centroides de las poblaciones no se encuentran muy separados, a la vez que la Lambda de Wilks refleja este comportamiento de la función. El porcentaje de casos correctamente clasificados es de  $71.7\%$  para un índice discriminante de  $DF = 0.0$ . Los controles estadísticos de la función (Lambda de Wilks, autovalor, etc) nos indican que no es una buena función. Como se puede observar la variable PENS es la más discriminante con un peso de  $1.182$  seguida por la variable VEGET con  $-0.691$  y la PENDM con  $-0.596$ . A éstas les siguen las variables AFS, ORI90 y CURVAR con pesos inferiores. Como en el caso de La Pobra de Lillet los valores discriminantes positivos favorecen la inestabilidad y los negativos la estabilidad.

Según los resultados de la función laderas con rangos medios de pendiente, orientaciones hacia el oeste, vegetación escasa, áreas de cuenca elevadas y zonas cóncavas favorecen la inestabilidad. A su vez, pendientes medias elevadas de la cuenca acumulada favorecen la estabilidad.

En la figura 3.33 se muestran los histogramas por separado con las poblaciones estable inestable según la función discriminante. Las celdas inestables, que deberían tener valores por encima del valor  $0$ , se distribuyen entre  $-1$  y  $+2.25$  con valor extremo (outlier) en  $-1.50$ , encontrándose un  $28\%$  de las mismas con valores por debajo del índice discriminante  $F = 0$ . Las celdas estables adoptan valores entre  $-3$  y  $+2.25$  con valores extremos en ambos lados (de  $-3.50$  y  $+2.75$ ) y estando un  $71.4\%$  de los casos bien clasificados. De estos resultados se deduce que las poblaciones estable e inestable se solapan entre los valores  $-1$  y  $+2.25$ , y por tanto, en un amplio rango de valores, que en este caso cubre la totalidad del rango de valores de la población inestable.

Las variables PENS, PENDM y VEGET incluidas en la función discriminante final también están presentes en las funciones de La Pobra y Vallcebre, aunque en este caso al

augmentar la pendiente media de la cuenca se favorece la estabilidad. Las variables PENS y VEG influyen en la estabilidad de la ladera de forma semejante en las tres áreas estudiadas, coincidiendo también con los resultados obtenidos por Baeza (1994). La variable AFS, muy correlacionada con ACUENCA, LONG y LFS (según se puede observar en la tabla 3.23 – matriz de correlaciones-) también es una variable presente en las funciones de las dos otras áreas estudiadas, aunque representada por alguna de las otras variables. La orientación de la ladera (ORIENT) se ha incluido en la función discriminante de Vallcebre, aunque priorizando orientaciones Norte-Sur, pero ha sido excluida de la función del área de La Poble de Lillet. Por otro lado, la variable CURVAR relativa al perfil convexo/cóncavo del terreno no se ha incluido en ninguna otra función aunque la variable PLA (perfil transversal de la ladera) está presente en la función de La Poble.

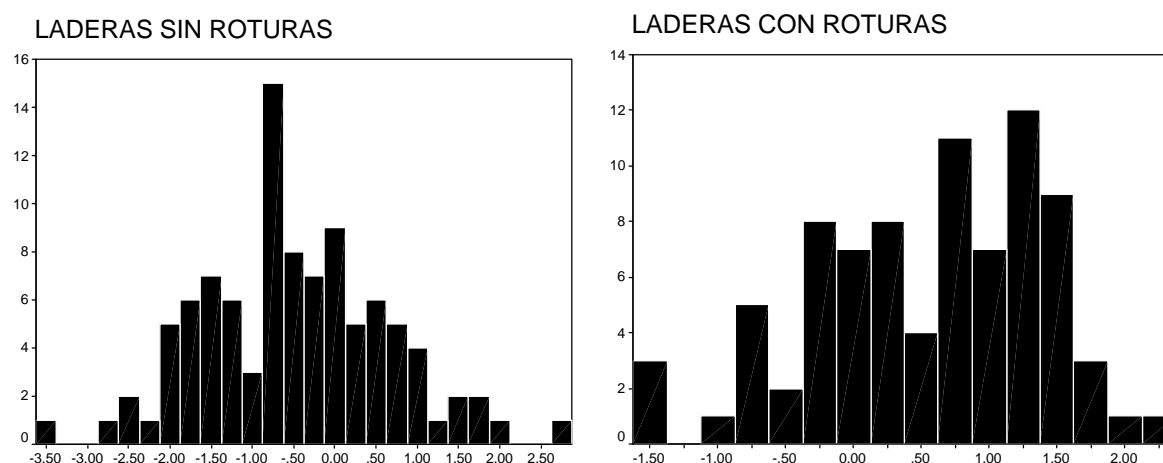


Figura 3.33: Histogramas de frecuencias con los valores de la función discriminante seleccionada en el Bajo Deba, para la muestra utilizada, con las dos poblaciones por separado (laderas con y sin roturas). Obsérvese el valor  $F = 0$  que separa las dos poblaciones según la función, indicando los valores positivos laderas inestables y los negativos laderas estables.

VARIABLES	COEFICIENTES DE LA FUNCIÓN	
	Estándar	No estándar
PENS	1.182	5.873
VEGET	-0.691	-0.176
PENDM	-0.596	-0.056
AFS	0.329	0.235
ORIENT	0.324	0.007
CURVAR	-0.280	-0.131
constant		-2.335

EIGENVALUE	WILKS- $\lambda$	$\chi^2$	PROB. %	CLASIFICACION ( $F = 0$ )
0.261	0.793	39.721	0.000	General 71.7 % Parcial (estable/inestable) 71.4% / 72.0%

Tabla 3.28: Variables y coeficientes estandarizados y no estandarizados de la función discriminante seleccionada del área del Bajo Deba. Se presenta la clasificación de aciertos de la función y otros parámetros estadísticos.

### Mapa de susceptibilidad y validación de la función

El mapa de susceptibilidad resultante del análisis se muestra en la figura 3.34. La validación de la predicción del mapa se realizó con el resto de celdas sin roturas del mismo evento no utilizadas para el análisis y el resto de celdas sin roturas del área. En la tabla 3.29 se muestran los resultados del índice de densidad relativa. Los valores del índice muestran que la predicción no es muy buena, debido a su oscilación cuando deberían aumentar del nivel menos al más susceptible. El nivel de susceptibilidad bastante baja presenta una rotura que hace aumentar el índice a un valor de casi 14 % cuando debería esperarse un valor de 0 o muy bajo. Este nivel representa el 1.9 % del área de estudio. En el nivel de susceptibilidad más alta no se encuentra ninguna rotura constituyendo el 0.05 % del área total.

ÍNDICE DE DENSIDAD RELATIVA			
Nivel de susceptibilidad	Nº de mov.	Nº de celdas	Índice
Muy baja	0	33	0.000
Bastante baja	1	1348	13.954
Baja	3	14980	3.767
Moderada	28	36365	14.483
Alta	34	16161	39.573
Bastante alta	2	1333	28.222
Muy alta	0	41	0.000

Tabla 3.29: Resultados del índice de densidad relativa aplicado al resto de celdas no utilizadas para el análisis en la zona piloto del Bajo Deba.

#### 3.3.6. Análisis comparativo

Los resultados de los análisis obtenidos de las tres zonas permiten comparar los siguientes aspectos:

- Distribución de las variables
- Dependencia de las variables
- Relación de las variables y la estabilidad. Funciones discriminantes.
- Validación de la función
- Aplicación del procedimiento
- Resultados del análisis discriminante de La Pobra sin la variable GROSOR

#### Distribución de las variables

Las variables constituidas por modelos digitales del terreno (el MDE y sus derivadas) presentan unas distribuciones, que para algunas de ellas son características con independencia del área de la que proceden. Como ya se ha comentado en el apartado 3.3.3. (Test de Normalidad de las variables de la zona de La Pobra de Lillet) se pueden definir 5 grupos atendiendo a la distribución de las variables derivadas. En la figura 3.16 se representan los grupos y las variables asociadas a cada uno. Los comentarios sobre estos grupos se encuentran también en el citado apartado.

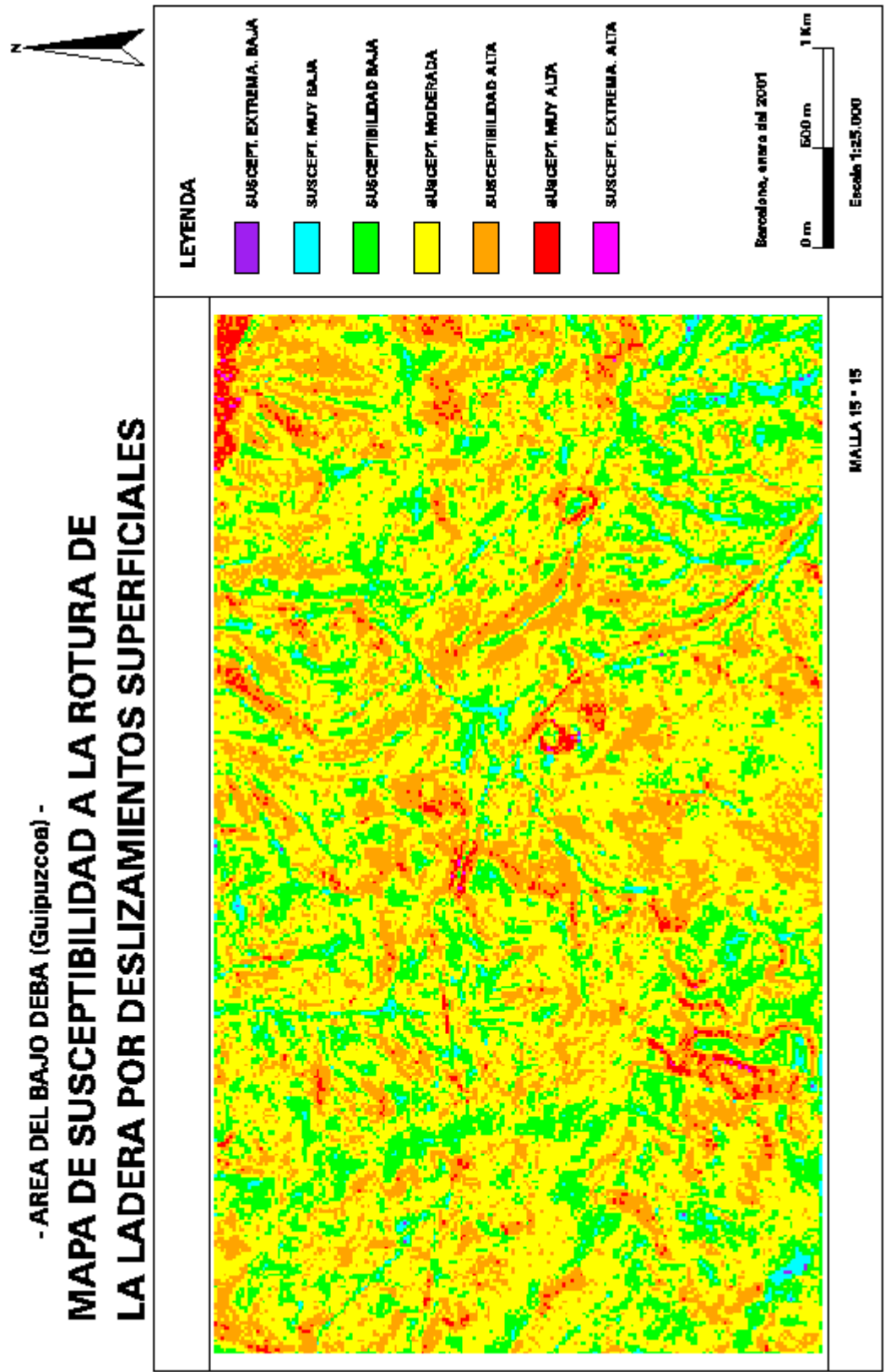


Figura 3.34: Mapa de susceptibilidad a los deslizamientos superficiales del Bajo Deba.

La distribución constituida por un pico alto en los valores bajos y el resto de valores separados (caso del cuarto grupo constituido inicialmente por la variable PENDM, y luego por las variables transformadas ACUENCA, LONG, AFS y LFS) precisa de un comentario adicional. Como se puede observar en figuras como 3.13 a 3.15 (Pobla de Lillet), 3.24 y 3.25 (Vallcebre) y 3.31 y 3.32 (Bajo Deba) la población restante presenta una distribución variable en el caso de PENDM para las distintas zonas, aunque acercándose a la normal, mientras que las variables transformadas presentan una distribución con sesgo positivo debido a su transformación (con logaritmo decimal).

Las variables PEND, PENDS, MDE y ORIENT son quizás las que pueden variar más de distribución dependiendo del área de estudio, y por tanto del relieve del área. A pesar de ello, la variable PEND tiende a una distribución normal y la variable PENDS presenta un sesgo negativo comparable a la variable INSOL, que nos permite incluirla en su grupo (quinto grupo de distribución). La distribución de la variable MDE es la menos predecible, dependiendo mucho del área de estudio. Finalmente, la variable ORIENT, que recordemos, se ha transformado para introducirla en el análisis, tenderá a una distribución bimodal debida a la transformación de variable circular a lineal.

### Dependencia de las variables

Los resultados de los análisis de las tres zonas muestran unas tendencias en la dependencia entre variables derivadas del MDE. Estas dependencias son las siguientes:

- Las variables PEND y PENDS
- Las variables ACUENCA, LONG, AFS y LFS
- Las variables CURVAR y PERFIL entre ellas y CURVAR y PLA

En las matrices de correlaciones de las tres zonas (tablas 3.6, 3.14 y 3.23) se observan las altas correlaciones entre los tres grupos comentados. En el caso de PEND y PENDS la correlación se debe al hecho que la segunda variable es una transformación de la primera. Las variables relacionadas con la cuenca pueden estar muy correlacionadas las cuatro, en el caso de una zona de estudio con o sin formación superficial en toda el área. Cuando existen tanto zonas con depósito superficial como zonas sin este, en una misma área de estudio, se pueden encontrar fuertes correlaciones entre ACUENCA y LONG por un lado y AFS y LFS por otro, y también las correlaciones entre ACUENCA y AFS entre ellas y LONG y LFS. Finalmente, las variables relativas a la convexidad/concavidad de la ladera presentan correlaciones, no tan fuertes, pero independientes del área, entre CURVAR y PERFIL por un lado y entre CURVAR y PLA por el otro. Ello es debido a que CURVAR representa la curvatura general de la ladera aglutinando tanto el concepto de curvatura longitudinal a la pendiente como transversal a la misma. Por esta razón las variables PERFIL y PLA no están correlacionadas entre sí, ya que explican cosas distintas.

Los análisis factoriales de las tres áreas muestran la formación de 5 a 6 factores (caso este último de Vallcebre) de los cuales los 3 primeros están constituidos siempre por las siguientes variables:

Primer factor: ACUENCA, LONG, AFS, LFS y con menor representación PENDM.

Segundo factor: PEND, PENDS, INSOL y en menor representación PENDM.

Tercer factor: CURVAR, PERFIL y PLA.

El resto de factores pueden estar formados por una o varias variables variando según la zona. Como se observa en las matrices de componentes rotados (ver tablas 3.5, 3.17 y 3.26), las variables MDE, ORIENT y RUGOS pueden representar ellas solas un factor. En dos de las zonas (La Pobla y el Bajo Deba) la variable MDE ha constituido un factor junto con GROSOR. Por su parte la vegetación (VEGET) se encuentra representando el mismo factor que las variables ORIENT y INSOL, pudiendo estar ambas formando parte de dos factores distintos o del mismo.

#### Relación de las variables y la estabilidad. Funciones discriminantes.

Los resultados de los análisis T.test y One-Way muestran la relación de algunas variables, con respecto a la estabilidad de las laderas, que se mantienen con independencia de la zona de estudio. Se trata de las variables PEND y su transformada PENDS. El resto de variables varían en cuanto a su poder discriminante respecto a las poblaciones con y sin roturas, aunque se pueden encontrar algunas tendencias, que para el caso del Bajo Deba no son del todo aplicables. La variable PENDM presenta un poder discriminante relativamente importante, así como la variable MDE (ésta última sólo en la Pobla de Lillet y en Vallcebre). Las variables relacionadas con la curvatura de la ladera tienen una cierta significación estadística que varía según la zona. Lo mismo ocurre con las variables relacionadas con la cuenca de drenaje (ACUENCA, LONG, AFS y LFS). Las variables relacionadas con la orientación (ORIENT e INSOL) tienen un poder discriminante aceptable e incluso alto en algunas áreas. La variable RUGOS es una de las que presenta menor o nulo poder discriminante. Por último las variables no derivadas del MDE (VEGET, GROSOR, FMS) varían su significación estadística, pudiendo tener un poder discriminante muy elevado, como en el caso de GROSOR en la Pobla de Lillet, aceptable como la variable VEGET en las tres áreas, y muy bajo como GROSOR en el Bajo Deba.

Los resultados del test One-Way del Bajo Deba, comparados con los de las dos otras zonas no son satisfactorios, con valores F muy bajos y generalizados para la mayor parte de las variables. De ello se puede deducir que el análisis discriminante no resultará en una función muy buena, como han demostrado los resultados del mismo. Las razones de los bajos valores de la F del test One-Way pueden ser varias. Por un lado está la selección de la muestra al azar sin considerar únicamente laderas sino todo el área. Esto puede influir en parte, aunque el mismo procedimiento se ha utilizado en La Pobla de Lillet y en Vallcebre, teniendo estas dos zonas valores discriminantes más altos. Por ello no creemos que la selección de la muestra tenga mucha influencia. La razón más lógica es que no se está utilizando una unidad de terreno adecuada, en tamaño, a la zona de rotura de los deslizamientos del Bajo Deba (se utiliza actualmente un punto o celda), o lo que viene a ser lo mismo, las propiedades de estos deslizamientos y de sus zonas de rotura no están bien representados para el tipo de análisis que aquí se utiliza. La mayor parte de los deslizamientos superficiales del Bajo Deba aquí estudiados, no tienen las mismas dimensiones que los de La Pobla y Vallcebre, en cuanto a zona de rotura se refiere. Por tanto, el uso de un punto centroide para definir la zona de rotura, que luego se transformará en una celda en formato raster, y que ha sido utilizado en el procedimiento presentado en la presente memoria, no es adecuado para los deslizamientos del área del Bajo Deba.

Una posible solución a ello es la digitalización de la zona de rotura y posterior transformación a formato raster de la misma. Si se utiliza la malla 15 \* 15 m seguramente, las zonas de rotura estarán comprendidas por más de una celda. En este caso el análisis se puede

llevar a cabo utilizando las funciones zonales de ARC/INFO para definir un único valor de cada variable en cada zona de rotura. En este caso, para las laderas estables parece lógico continuar utilizando una celda para definir los valores de las variables, aunque ello se debería comprobar.

Otra causa de los malos resultados del Bajo Deba, es quizás la necesidad no sólo de adecuar la malla al tamaño de las zonas de rotura de los deslizamientos, si no adecuar el análisis a la naturaleza misma de éstos. Nos referimos a la diferencia entre los deslizamientos del Bajo Deba y los de las otras dos áreas en cuanto a dimensiones y espesor del deslizamiento. Es posible que al ser deslizamientos distintos algunas de las variables que se usan con éxito en La Pobla y Vallcebre para discriminar entre las dos poblaciones, no tengan relación con la estabilidad en el área del Bajo Deba. En esta zona debería hacerse un estudio de campo para identificar otro, u otros factores relacionados con la inestabilidad que no lo están para las dos zonas del prepirineo catalán.

La variable GROSOR, que en la Pobla de Lillet es la que presenta el poder discriminante más elevado, sorprende en el Bajo Deba con un poder muy reducido. Ello se explica fácilmente observando el mapa de esta variable (consúltase Anejo 2) en esta última zona y la tabla 3.30. Se puede comprobar que aunque todos los deslizamientos se encuentran en la categoría de espesor superior a 0.5 m de depósito superficial, también es fácil observar que, precisamente, esta categoría es la que domina, en cuanto a superficie, en la zona de estudio. De ello se deduce que la mayor parte de las celdas sin roturas seleccionadas al azar para la muestra del análisis, pertenecerán a esta categoría, y que, por tanto, el espesor de la formación superficial no ayuda a discriminar entre celdas con y sin roturas. Observando el mismo mapa de la variable (ver Anejo 2) se comprueba que la mayor parte del área del Bajo Deba está ocupada por formación superficial, lo que supone que la variable FMS (presencia de formación superficial) no tiene poder discriminante para utilizarla en el análisis en lugar de GROSOR y, por otro lado, las variables relacionadas con la cuenca de todo el área (ACUENCA y LONG) o de la ocupada por la formación superficial (AFS y LFS) no se diferencian entre ellas debido a que casi toda el área presenta formación superficial.

Categoría	Nº deslizamiento	% deslizamiento	Nº celdas	% área
Roca	0	0	859	1.2
0-0.5 m espesor	0	0	408	0.5
>0.5 m espesor	150	100	69174	98.2

Tabla 3.30: Área expresada en número de celdas y porcentaje, así como deslizamientos presentes en las 3 categorías de la variable GROSOR de la zona del Bajo Deba.

No creemos que los malos resultados del Bajo Deba sean debidos, en gran parte, a una débil influencia de las variables utilizadas con los deslizamientos superficiales del área. Antes bien, nos inclinamos por la combinación de las diversas causas expuestas anteriormente (unidad de terreno incorrecta para la zona de rotura, deslizamientos distintos a los del prepirineo catalán y relacionados con algún otro factor que no se contempla). La unidad de terreno incorrecta se puede justificar utilizando las variables PEND y PENDS de las que se conoce demostradamente su influencia en la estabilidad. En el caso del Bajo Deba, estas variables, incluso siendo las que presentan un poder discriminante mayor, tienen unos valores bastante o mucho más bajos que los que presentan las mismas variables en las otras zonas. De ello se deduce que no se trata, únicamente, de la utilización de variables inadecuadas, en cuanto a su influencia con la inestabilidad se refiere. Cabe comentar aquí, que el relieve del Bajo Deba es bastante distinto al de las otras dos áreas, con un relieve de media a baja montaña con morfologías suaves para el primer caso, y relieves de alta montaña bastante

accidentados en el segundo caso. Ello conlleva un suavizado de algunas de las características relativas a la geometría de la ladera, suavizado que se acentúa aún más en las variables utilizadas, expresadas como modelos del terreno (MDE, PEND, CURVAR, PERFIL, PLA y PENDM). Este suavizado concentra los valores de las variables, limitando el rango de valores posibles y, a su vez, reduciendo diferencias que puedan existir entre las celdas con y sin roturas.

Las funciones discriminantes obtenidas en las tres áreas presentan algunas similitudes y algunas diferencias, tanto en cuanto a las variables incluidas en las funciones como a la bondad de las mismas para discriminar las dos poblaciones.

Como ya se ha comentado en el apartado pertinente para cada una de las zonas, existen 3 variables incluidas en todas las funciones: PEND o PENDS (considerando que la segunda es una transformación de la primera), PENDM y VEGET. También la influencia de la cuenca queda reflejada en las 3 funciones, con alguna de las siguientes variables LONG, LFS y AFS. Las variables grosor de la formación superficial o existencia de ésta (GROSOR y FMS) se incluyen en las dos zonas del Prepirineo, siendo la variable GROSOR en La Poble de Lillet, muy significativa. La variable altitud (MDE) también forma parte de las funciones de estas dos áreas, mientras que las variables relativas a la orientación y a la curvatura general de la ladera se incluyen en el Bajo Deba (ORIENT y CURVAR) pero no en las otras dos zonas en la misma función. Así en la Poble de Lillet es el perfil transversal a la pendiente (PLA) la variable incluida en la función, mientras que en Vallcebre son significantes las dos variables relativas a la orientación (ORIENT y INSOL).

Parece evidente la influencia de algunas variables en la susceptibilidad a la rotura por deslizamiento superficial, como también se hace evidente observando los resultados, la poca influencia de alguna variable como RUGOS, quizás debido a la definición de la variable utilizada aquí (valores normalizados). Aunque según la muestra utilizada de una zona, la función seleccionada variará de una muestra a otra, y varía también en el caso de utilizar la misma muestra (según la combinación escogida y los criterios empleados en la selección), se hace patente la inclusión de algunas variables en las 3 funciones finales. Estas variables son: la pendiente de la ladera (la derivada del MDE o su función senoidal), la pendiente media de la cuenca, la vegetación y la cuenca de drenaje (esté representada esta por el área de cuenca acumulada o por la longitud de ésta, de todo el área o de la formación superficial). Otro factor importante parece ser la existencia de la formación superficial o bien el espesor de ésta (aunque no es el caso del Bajo Deba por ser un área prácticamente cubierta de depósitos superficiales). Las laderas orientadas hacia el Sur presentan mayor inestabilidad que las otras. Finalmente, laderas convexas según la transversal a la pendiente son más estables, y por otra parte, laderas con perfil convexo en la dirección longitudinal de la pendiente presentan mayor inestabilidad.

Si se generalizan los resultados al aumentar la pendiente de la ladera, el espesor de los depósitos superficiales y el área cuenca se favorece la inestabilidad. Por otro lado al disminuir la cobertura vegetal, la insolación de la ladera y al aumentar la convexidad de la misma se favorece la estabilidad.

Como ya se ha comentado las funciones discriminantes no son funciones ideales atendiendo a los controles estadísticos de las mismas. Ello es debido, en gran parte al uso de variables, la mayor parte de las cuales son modelos digitales del terreno que facilitan los valores promedio (efecto soporte en geostatística) de las variables frente a valores recogidos en el campo con un rango más amplio. Según estos parámetros estadísticos la mejor función



es la de la Pobra de Lillet, seguida por la de Vallcebre. La función seleccionada para el Bajo Deba presenta unos controles estadísticos que indican la poca discriminación de la función. Ello es debido al bajo poder discriminante de las variables utilizadas causado, a su vez, por el uso de una unidad de terreno inadecuada para los deslizamientos del área, entre otras causas.

#### Validación de la función.

El procedimiento y el índice utilizado para validar la función parecen acertados y dan una idea de la idoneidad de las variables utilizadas y de la función seleccionada para predecir deslizamientos superficiales en cada área. El dividir la malla discriminante en un número de clases de igual rango evita la subjetividad de la zonación del mapa de susceptibilidad final. Por otra parte, la tendencia creciente del valor del índice de densidad relativa aplicado, ayuda en la interpretación de la calidad de la validación, y por tanto, de la predicción de la función discriminante seleccionada.

Según esto si se comparan los resultados de validación de las tres áreas se observa un comportamiento adecuado del índice en las áreas de La Pobra y Vallcebre. En estas áreas el índice crece con el nivel de susceptibilidad, exceptuando el último nivel de La Pobra de Lillet. También, como es de esperar, los dos niveles de susceptibilidad baja presentan un índice cero relativo a la ausencia de deslizamientos en estos niveles. El siguiente nivel (definido como susceptibilidad baja) presenta un índice de densidad relativa bajo que expresa la existencia de algunos deslizamientos en un área relativamente pequeña o la presencia de unos cuantos deslizamientos en una gran superficie.

En la zona del Bajo Deba el índice de densidad relativa no presenta la tendencia a aumentar con el nivel de susceptibilidad, presentando un comportamiento oscilante. Ello se debe a la baja discriminación de la función seleccionada para separar las dos poblaciones (con rotura y estables), que a su vez viene provocada por el uso de una unidad de terreno incorrecta, como ya se ha comentado previamente. En esta zona el segundo nivel de susceptibilidad baja presenta un valor del índice relativamente grande que disminuye en el siguiente nivel para aumentar en los dos siguientes.

#### Aplicación del procedimiento.

Los resultados de la aplicación del procedimiento presentado en esta memoria, permiten evaluar el mismo, definiendo una serie de ventajas y limitaciones que se exponen seguidamente.

Las ventajas del procedimiento radican en el automatismo de la obtención de un buen número de variables (factores) que se conoce participan en la estabilidad de las laderas, derivando estas variables de un MDE. En el procedimiento utilizado aquí las variables no derivadas del MDE han precisado de un trabajo de fotointerpretación, campo y digitalización, que en posteriores aplicaciones, se puede evitar (en el caso de variables como VEGET y FMS) utilizando técnicas de tratamiento de imágenes. Por tanto, la obtención de la información puede ser un proceso bastante rápido. Así mismo la repetitividad del proceso, la objetividad del mismo y la regionalización de este tipo de análisis son ventajas a tener en cuenta.

El análisis de los datos (análisis de susceptibilidad) es un proceso que también precisa de poco tiempo con el uso de ARC/INFO y SPSS. Mayor tiempo precisa la interpretación de los resultados y del análisis estadístico. Una última ventaja es la utilidad del procedimiento

para analizar la susceptibilidad a la rotura de laderas por deslizamientos superficiales, siempre y cuando se adecue la unidad de terreno utilizada a la zona de rotura (dimensión) de los deslizamientos estudiados.

El principal inconveniente del procedimiento es la bondad de las funciones discriminantes obtenidas. Con las variables derivadas del MDE utilizadas aquí, la función final tenderá a tener unos controles estadísticos semejantes a los obtenidos en las aplicaciones de La Pobra de Lillet y Vallcebre. Estas funciones sólo pueden mejorar teniendo en cuenta tres aspectos: una adecuada resolución del MDE (mejorada todavía más con una buena precisión), el uso de alguna variable, seguramente no derivada del modelo, que influya muy claramente en la estabilidad de un área y, finalmente, una adecuada ponderación de las variables no derivadas del MDE.

En el primer caso, con una resolución adecuada del MDE a las zonas de roturas, se favorece el aumento del poder discriminante de las variables derivadas del mismo (como PEND, PENDM, ACUENCA, etc). Ello hará aumentar la calidad de la función discriminante final. Por otro lado el uso de alguna variable, como GROSOR en el caso de La Pobra de Lillet, con una influencia muy marcada en la estabilidad de las laderas del área, ayuda enormemente en la calidad de la función final.

Otro inconveniente, o en todo caso factor a tener en cuenta, es que el procedimiento será útil en la medida que se ajuste la unidad de terreno utilizada a las dimensiones de las zonas de rotura (que son las que se analizan) de los deslizamientos a estudiar. Con ello queremos decir que aunque una zona tenga deslizamientos superficiales, no se puede aplicar el procedimiento sin tener en cuenta el tamaño de éstos y de la unidad de terreno (celda) utilizada. Si no se ajustan las zonas de rotura con la unidad de terreno de la malla regular utilizada, los resultados pueden ser bastante malos y poco válidos.

Finalmente, el último inconveniente o limitación del procedimiento utilizado, inherente a la forma de estimar la susceptibilidad, es la combinación lineal de varias variables para el cálculo de la susceptibilidad, lo que conlleva la existencia de errores debidos a esta limitación y a otras causas como la rasterización de las variables vectoriales. También cabe tener en cuenta la posibilidad de producirse errores en todos los pasos del procedimiento.

### Resultados del análisis discriminante de la Pobra de Lillet sin la variable GROSOR

Como se puede comprobar y comparar con los resultados obtenidos de las tres zonas, la variable GROSOR utilizada en la zona de La Pobra de Lillet tiene una significancia estadística alta para discriminar entre la población estable y la inestable. Esta variable no derivada del MDE es la que precisa más trabajo de campo, y por tanto, un esfuerzo de tiempo y dinero mayor. Es obvio que en otras zonas donde se quiera aplicar el procedimiento esta variable no siempre estará disponible, como es el caso del área de Vallcebre. Es por ello que se ha realizado el análisis discriminante sin esta variable, pero utilizando la variable FS que indica la presencia o ausencia de formación superficial. La recogida de información de ésta última, precisa solamente de la fotointerpretación, siendo su coste de obtención mucho menor. En este apartado se presentan los resultados obtenidos.

Las variables utilizadas para el análisis discriminante son las mismas seleccionadas previamente en el área (apartado 3.3.3., selección de las variables). Se han realizado distintas combinaciones de variables con PEND y PENDS por separado. La función discriminante seleccionada se muestra en la tabla 3.31. En este caso la función ha seleccionado 8 variables

que son las mismas que la función con GROSOR, más la orientación (ORIENT) y la nueva variable FS (presencia de la formación superficial). Al aumentar los valores de estas dos variables aumenta la inestabilidad. En el caso de la orientación indica que laderas orientadas al Sur son más susceptibles a las roturas. La variable MDE (elevación) es la segunda con un peso de 0.645 indicando que a mayor elevación más estabilidad. En la matriz de correlaciones (ver tabla 3.6) se observa que esta variable está relacionada con el GROSOR formando el mismo factor en el análisis factorial. Los parámetros estadísticos de la función indican que no separa tan bien las dos poblaciones comparada con la función con la variable GROSOR (ver tabla 3.10). También se observa una disminución de más de 8% en la clasificación de la población inestable, mientras que la estable ha aumentado un poco. Los valores discriminantes oscilan entre  $-3.75$  y  $3.25$  con centroides en  $-0.658$  para la población estable y  $0.816$  para la inestable (ver figura 3.35). Con la inclusión de la variable GROSOR en el análisis los centroides se encuentran más separados, que con su exclusión, confirmando el elevado poder discriminante de esta variable en la zona de estudio.

VARIABLES	COEFICIENTES DE LA FUNCIÓN	
	Estándar	No estándar
PEND	0.896	0.118
MDE	-0.645	-0.004
PENDM	-0.386	-0.034
PLA	-0.379	-0.29
FS	0.359	0.485
VEG	-0.345	-0.092
ORIENT	0.304	0.006
LFS	0.248	0.289
Constante		0.395

EIGENVALUE	WILKS- $\lambda$	$\chi^2$	PROB. %	CLASIFICACION (F = 0)
0.541	0.649	134.85	0.000	General 79.3 % Parcial (estable/inestable) 77.4% / 81.7%

Tabla 3.31: Resultados de la función discriminante seleccionada de la Población de Lillet sin la variable GROSOR.

El mapa de susceptibilidad se observa en la figura 3.36. En la tabla 3.32 se muestran los resultados del índice de densidad relativa utilizado. Los valores del índice varían entre una función y otra aunque la tendencia se mantiene. Con esta función los 3 niveles de susceptibilidad baja no presentan ningún deslizamiento al igual que el nivel más susceptible. Éste contiene 73 celdas que representan el 0.04% del total de celdas utilizadas para validar. Utilizando únicamente el índice de densidad relativa, parece que la predicción es ligeramente mejor con la función sin la variable GROSOR en la Población de Lillet aunque un poco distinta de la de Vallcebre. Comparado con Vallcebre, el índice resultante es mejor en los niveles de susceptibilidad baja en la zona de la Población de Lillet excepto en el nivel más susceptible donde el índice es 0.

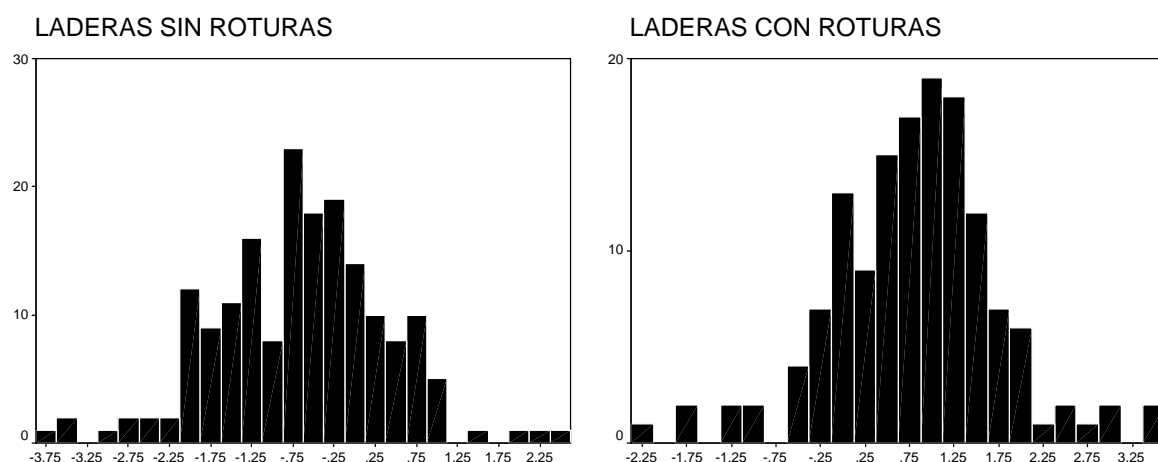


Figura 3.35: Histogramas de frecuencias con los valores de la función discriminante seleccionada en la Población de Lillet (sin utilizar la variable GROSOR), para la muestra utilizada, con las dos poblaciones por separado (laderas con y sin roturas). Obsérvese el valor  $F = 0$  que separa las dos poblaciones según la función, indicando los valores positivos laderas inestables y los negativos laderas estables.

INDICE DE DENSIDAD RELATIVA									
	LA POBLA DE LILLET (con GROSOR)			LA POBLA DE LILLET (sin GROSOR)			VALLCEBRE		
Nivel de susceptibilidad	Nº de mov.	Nº de celdas	Índice	Nº de mov.	Nº de celdas	Índice	Nº de mov.	Nº de celdas	Índice
<b>Muy baja</b>	0	258	0.000	0	156	0.000	0	521	0.000
<b>Bastante baja</b>	0	6634	0.000	0	4209	0.000	0	16669	0.000
<b>Baja</b>	1	55124	0.245	0	33864	0.000	14	86302	1.540
<b>Moderada</b>	18	74685	3.255	21	94017	2.829	42	73377	5.435
<b>Alta</b>	100	38582	35.009	94	42613	27.937	53	32101	15.677
<b>Bastante alta</b>	9	1977	61.49	13	2378	69.234	27	7632	33.591
<b>Muy alta</b>	0	49	0.000	0	73	0.000	1	217	43.757

Tabla 3.32: Índice de densidad relativa de las áreas de la Población de Lillet y Vallcebre, obtenido con el resto de celdas no utilizadas para el análisis, de las funciones discriminantes seleccionadas (con y sin GROSOR para la zona de la Población de Lillet).

Comparando los resultados con los de la zona de Vallcebre (ver tablas 3.10, 3.20 y 3.31) se observa que la función sin GROSOR, ha introducido las mismas variables que las de la función de la zona de Vallcebre, exceptuando PLA para la Población i INSOL en Vallcebre. Si se observan los parámetros estadísticos (Lambda de Wilks, etc.) se comprueba la semejanza entre las dos funciones. Ello nos lleva a pensar que si no se dispone de alguna variable tan discriminante como GROSOR en la Población, los controles estadísticos de las funciones seleccionadas siempre presentarán estos valores. Esto es interesante dado que esta variable es la más costosa de obtener de las 3 variables no derivadas que se han utilizado.

Comparando las clasificaciones de los aciertos de las funciones de la Población con y sin GROSOR y de Vallcebre (ver tablas 3.10, 3.20 y 3.31) se observa que son parecidas, siendo mejores los aciertos para la población inestable en La Población, y mejores los estables en Vallcebre.

- LA POBLA DE LILLET (Barcelona) -

## MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A LA ROTURA DE LA LADERA POR DESLIZAMIENTOS SUPERFICIALES

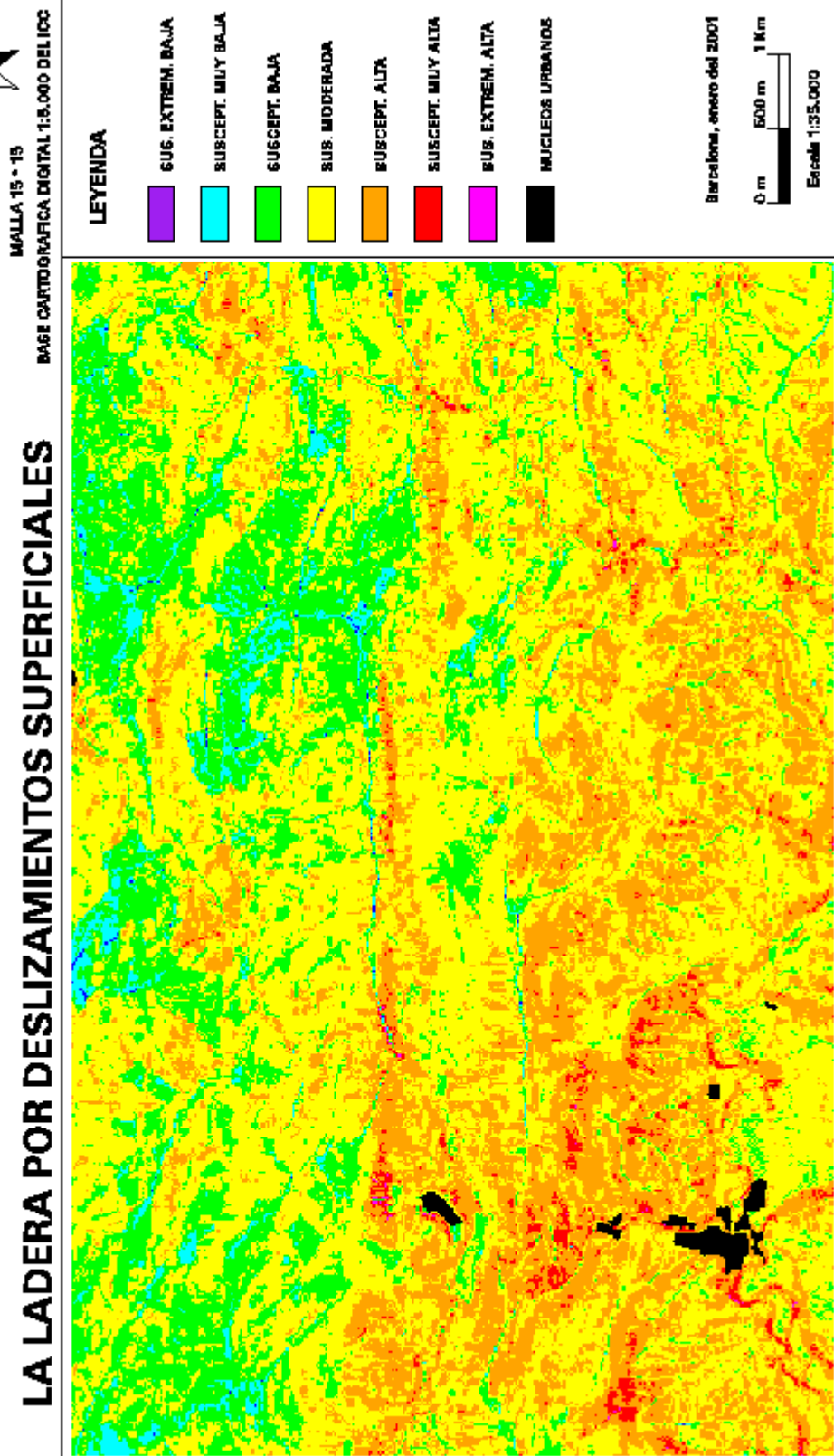


Figura 3.36: Mapa de susceptibilidad a los deslizamientos superficiales de la Pobla de Lillet sin la variable GROSOR.

### **3.3.7. Análisis de sensibilidad (La Pobra de Lillet)**

Los resultados presentados hasta el momento podrían muy bien darse por válidos, y aunque demuestran la utilidad y aplicación del procedimiento, deben ser valorados desde el punto de vista de algunas limitaciones. Estas limitaciones relativas al método empleado o a la zona de estudio se comentan en este apartado mediante algunos resultados de análisis de sensibilidad realizados. Los análisis de sensibilidad se han llevado a cabo para determinar la influencia de dos aspectos importantes en los resultados finales y en la estimación de la susceptibilidad :

- la heterogeneidad de una zona
- la ponderación de las variables categóricas utilizadas

El primer punto se analiza en la zona de la Pobra de Lillet utilizando sólo la zona sur, más susceptible a los deslizamientos. Con el análisis se pretende deducir como varían los resultados cuando se analiza una zona más homogénea, y en este caso, más susceptible, como es la zona sur del área.

El segundo punto analiza la influencia de la ponderación de las variables categóricas utilizadas en el análisis. La ventaja de utilizar pocas variables categóricas (vegetación y espesor o bien presencia de la formación superficial) frente al resto de variables continuas, se ve limitada al hecho de como se ponderan éstas y de la influencia de esta ponderación. Cabe recordar que, según la zona, una de estas variables tiene un poder discriminante muy alto, es el caso de la variable GROSOR en La Pobra de Lillet, y que todas ellas terminan formando parte de la función discriminante. La influencia de la ponderación se analiza tanto en la Pobra de Lillet como en Vallcebre.

#### Resultados del análisis discriminante de la zona sur de La Pobra de Lillet

Como se puede observar en el apartado 3.3.3. y la figura 3.19, a raíz de los resultados de los análisis de la zona de La Pobra de Lillet, ésta presenta una acusada heterogeneidad en cuanto a distribución de deslizamientos, presencia de formación superficial y, consiguientemente, susceptibilidad a roturas entre el área Norte y Sur de la zona. Esta heterogeneidad no se observa en las dos otras áreas analizadas (Vallcebre y Bajo Deba). Atendiendo a esta diferencia cabe preguntarse cómo puede influir la misma en los resultados del análisis de susceptibilidad. La respuesta a esta cuestión se puede obtener utilizando únicamente la zona sur del área como área piloto para realizar todo el análisis estadístico y el posterior mapa de susceptibilidad.

En este apartado se presentan resumidamente los resultados obtenidos del análisis de susceptibilidad de la zona sur (ver figura 3.37) de la Pobra y el mapa de susceptibilidad obtenido. Para el análisis estadístico se ha utilizado la misma muestra obtenida al azar utilizada en los análisis previos del área, ampliada en número para el caso de las celdas sin roturas (estables) con el objetivo de igualar, en lo posible, el número de las dos poblaciones. Ello se debe a que al reducir el área de análisis, el número de celdas sin roturas se ha reducido dado que estaban repartidas por todo el área. Con las celdas con roturas se da también una reducción del número de éstas, aunque mucho menor, dado que la mayor parte de los deslizamientos se concentran en la zona sur del área de la Pobra.

–LA POBLA DE LILLET (Barcelona)–

### Zona Sur de la Pobla de Lillet con la muestra aleatoria utilizada

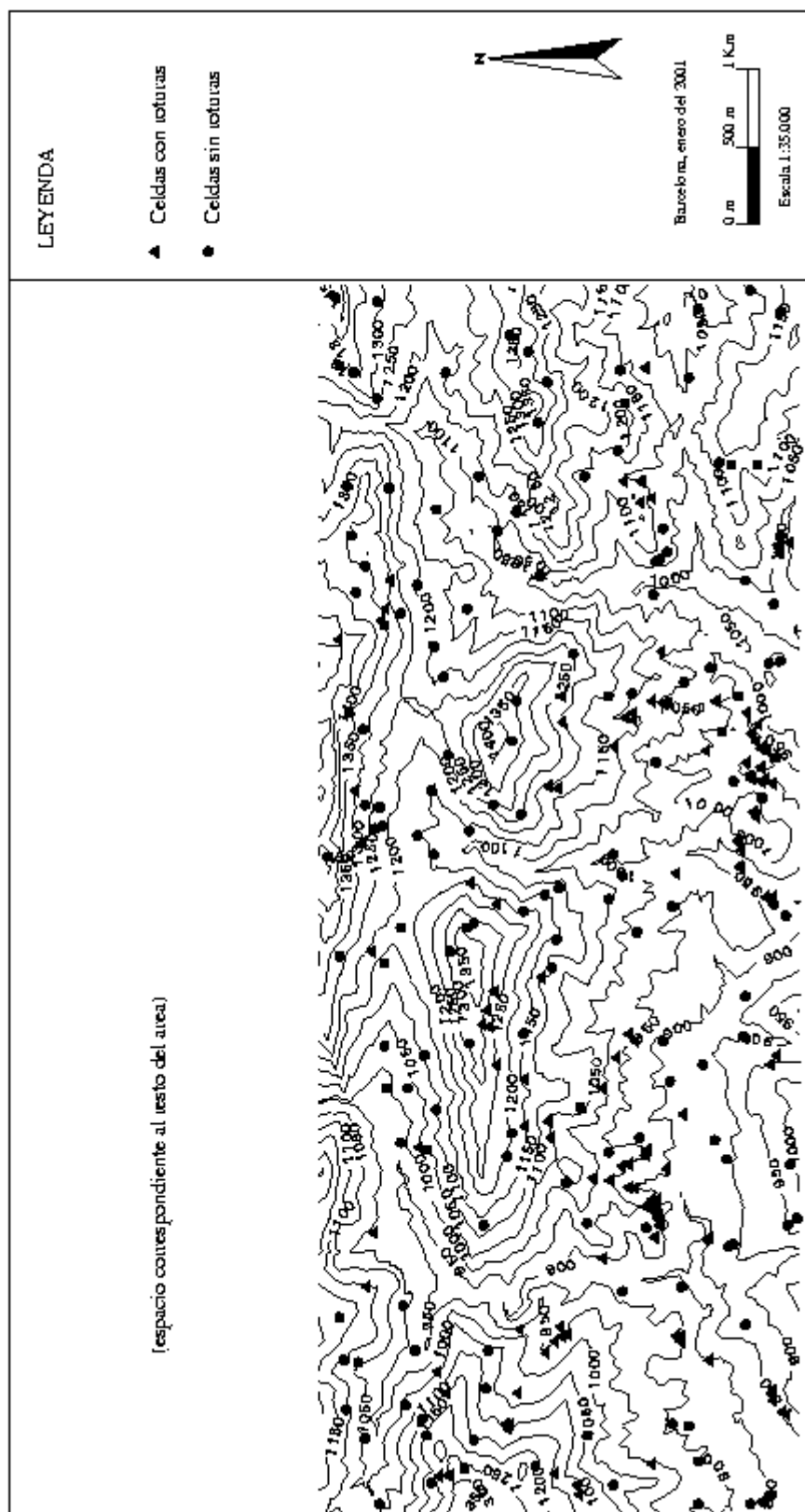


Figura 3.37: Mapa del area Sur de la Pobla de Lillet con la muestra aleatoria seleccionada utilizada en el analisis para este area.

Para el análisis estadístico se han utilizado las mismas variables que en los anteriores análisis, utilizando en este caso la variable GROSOR. Las transformaciones llevadas a cabo en algunas variables son las mismas que en los anteriores análisis. Seguidamente se comentan los aspectos más relevantes de los resultados.

El Análisis Factorial de Componentes Principales muestra unos resultados similares a los obtenidos en anteriores análisis en todo el área de La Población. Se observan las mismas correlaciones entre variables (ver tabla 3.33) y los factores resultantes en la matriz rotada son los mismos exceptuando los dos últimos que han variado el orden de aparición (ver tabla 3.34).

<b>MATRIZ DE COMPONENTES ROTADOS (Rotación Varimax)</b>					
Variables	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5
MDE					-0.735
PEND		0.969			
PENDS		0.958			
ORIENT				0.834	
INSOL		-0.736		0.541	
RUGOS			0.4521		
CURVAR	-0.439		0.863		
PERFIL			-0.834		
PLA	-0.502		0.640		
ACUENCA	0.936				
LONG	0.953				
AFS	0.943				
LFS	0.949				
PENDM	0.737	0.527			
VEG				-0.715	
GROSOR					0.878

Tabla 3.34: matriz con los pesos de las variables para cada uno de los 5 factores resultantes del Análisis Factorial con los valores mayores de 0.4.

Los resultados del Test One-way (ver tabla 3.35) muestran el poder discriminante de variables como GROSOR, las pendientes de la ladera (PEND y PENDS), la elevación y en menor grado la curvatura transversal a la pendiente. Las variables curvatura en la dirección de la pendiente y la rugosidad presentan un poder discriminante nulo siendo rechazadas para el análisis discriminante.

El análisis discriminante se ha llevado a cabo, como en los anteriores análisis, con las variables seleccionadas que en este caso son todas menos PERFIL y RUGOS, como ya se ha comentado, y ACUENCA y LLFS por estar muy correlacionadas con LONG y LAFS.

Se han realizado distintas combinaciones de variables con PEND y PENDS por separado en distintos análisis discriminantes. La función discriminante seleccionada se muestra en la tabla 3.36. La función ha seleccionado 8 variables siendo prácticamente las mismas que las seleccionadas en el análisis sin la variable GROSOR. Los resultados de la clasificación son ligeramente inferiores (se reducen un 3%) a los obtenidos con la función obtenida de todo el área y con la variable GROSOR. Los valores discriminantes oscilan entre -3.5 y 2.5 con centroides en -0.680 para la población estable (sin roturas) y 0.787 para la





inestable (ver figura 3.38). Los controles estadísticos como la Lambda de Wilks son parecidos a los obtenidos para el análisis del área entera.

VARIABLES	TEST ONE-WAY F RATIO	VARIABLES	TEST ONE-WAY F RATIO
MDE	21.2	PLA	12.3
PEND	22.9	ACUENCA	4.7
PENDS.	27.5	LONG	5.1
ORIENT	4.3	AFS	4.3
INSOL	2.8	LFS	4.5
RUGOS	0.088	PENDM	7.5
CURVAR	7.67	VEG	4.7
PERFIL	0.87	GROSOR	49.8

Tabla 3.35: Resultados del test One-Way de análisis de varianzas.

Según la función rangos intermedios de pendientes de las laderas, espesores superiores a 0.5 m de formación superficial, longitudes de cuenca altas y orientaciones hacia el sur favorecen las roturas de las laderas. Por el contrario, altas elevaciones de la zona, pendientes medias altas de cuenca, perfiles convexos de ladera en la dirección transversal a la pendiente de la misma y vegetación densa, favorecen la estabilidad de las laderas.

VARIABLES	COEFICIENTES DE LA FUNCIÓN	
	Estándard	No estándar
PENDS	0.907	5.028
GROSOR	0.541	0.694
MDE	-0.464	-0.003
PENDM	-0.332	-0.028
PLA	-0.296	-0.216
LONG	0.242	0.286
VEG	-0.229	-0.065
ORIENT	0.181	0.003
Constante		-2.258

EIGENVALUE	WILKS-λ	χ <sup>2</sup>	PROB. %	CLASIFICACION (F = 0)
0.539	0.650	121.107	0.000	General 78.7 % Parcial (estable/inestable) 71.4% / 87.2%

Tabla 3.36: Resultados de la función discriminante seleccionada de la zona sur de La Pobra de Lillet.

En la figura 3.39 se presenta el mapa de susceptibilidad obtenido para el área sur de La Pobra y en la tabla 3.37 se pueden observar los resultados del índice de densidad relativa aplicados al resto de celdas no utilizadas en el análisis. El índice muestra valores 0 en los niveles de susceptibilidad baja y un valor de 33 en el nivel más susceptible debido a la presencia de un deslizamiento en este nivel.

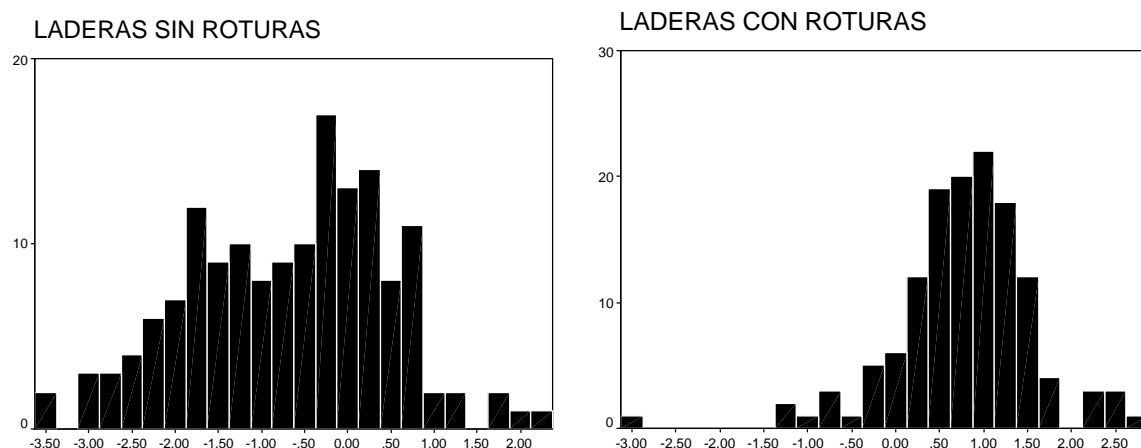


Figura 3.38: Histogramas de frecuencias con los valores de la función discriminante seleccionada en la zona sur de la Población de Lillet, para la muestra utilizada, con las dos poblaciones por separado (laderas con y sin roturas). Obsérvese el valor  $F = 0$  que separa las dos poblaciones según la función, indicando los valores positivos laderas inestables y los negativos laderas estables.

Si se compara el mapa obtenido con el análisis de todo el área (ver figura 3.19) y el mapa de susceptibilidad obtenido en la zona sur (figura 3.39) para la misma área se aprecia, claramente, que los niveles de susceptibilidad elevada han aumentado en área, al utilizar sólo datos de la zona sur del área, zona de por sí más susceptible a las roturas. Lo mismo se puede observar al comparar los resultados del índice de densidad relativa (ver tablas 3.11 y 3.37). En estas tablas no sólo se observa el aumento de área de los niveles más susceptibles para la zona sur de La Población si no que también se observa que los deslizamientos utilizados en la validación se distribuyen desde el nivel moderado al de susceptibilidad muy alta. Atendiendo sólo al índice de densidad relativa parecen mejores los resultados obtenidos utilizando sólo la zona sur de La Población que los obtenidos utilizando todo el área.

ÍNDICE DE DENSIDAD RELATIVA			
Nivel de susceptibilidad	Nº de mov.	Nº de celdas	Índice
Muy baja	0	55	0.000
Bastante baja	0	815	0.000
Baja	0	5537	0.000
Moderada	4	32044	1.522
Alta	32	48692	8.013
Bastante alta	88	18805	57.059
Muy alta	1	365	33.406

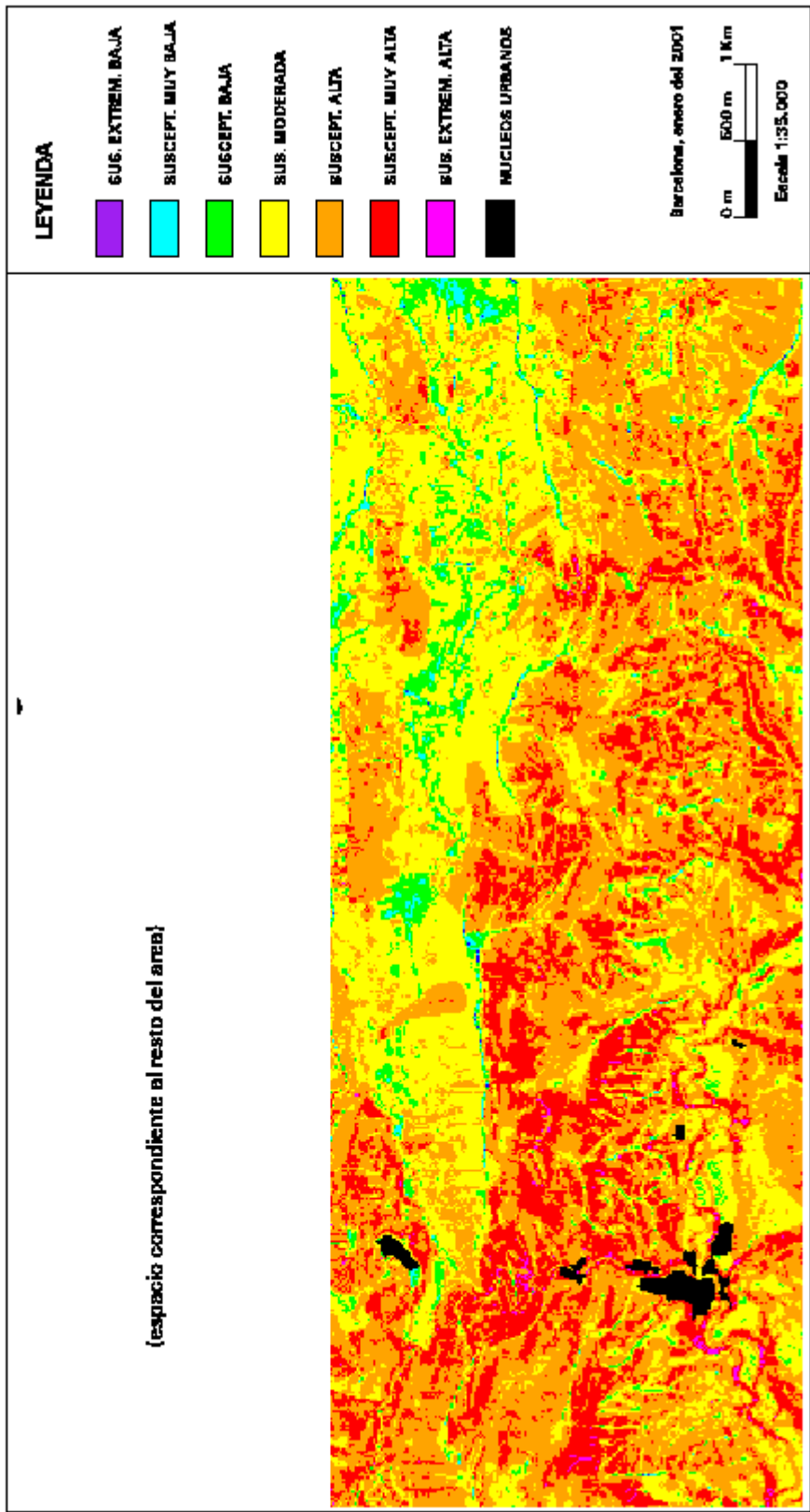
Tabla 3.37: Índice de validación obtenido en la zona sur del área de La Población de Lillet.

Los resultados demuestran que existe una notable diferencia en el mapa de susceptibilidad si se analiza una zona heterogénea, en cuanto a ocurrencia de deslizamientos se refiere, y, por tanto, en cuanto a susceptibilidad, que si se utiliza una zona más homogénea (en nuestro caso la zona Sur de La Población que es la zona más susceptible). Ello quiere decir que según el tipo de zona que se estudie, los resultados de la evaluación de la susceptibilidad y el mapa final variarán en función de la heterogeneidad de la zona, entendiendo esta heterogeneidad como diferencias en alguna o algunas variables que condicionan, de forma importante, la susceptibilidad del área a deslizamientos de tipo superficial.

- LA POBLA DE LILLET (Barcelona) -  
**MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A LA ROTURA DE  
 LA LADERA POR DESLIZAMIENTOS SUPERFICIALES**



MAILLA 15 - 15  
 BASE CARTOGRAFICA DIGITAL 1:5.000 DEL ICC



{espacio correspondiente al resto del area}

Figura 3.39: Mapa de susceptibilidad a los deslizamientos superficiales de la zona Sur de la Pobla de Lillet.

Los dos resultados son coherentes si nos fijamos en las variables seleccionadas en la función discriminante final y la relación que se intuye o, que se espera a priori, entre estas variables y la estabilidad de la ladera. Pero ¿cuál de los dos mapas es el más adecuado para utilizar en el área sur de la Población de Lillet?

Responder esta cuestión no es fácil. Por un lado está el tema de las celdas definidas a priori como celdas estables, o mejor dicho celdas sin roturas. Al escoger al azar estas celdas se puede fácilmente seleccionar, sin saberlo, algunas de ellas que de por sí sean susceptibles, aunque con la intensidad de lluvia caída en el episodio del Noviembre de 1982, no sobrepasaran el umbral necesario para romper la ladera. Ello conduce a obstaculizar la separación entre laderas con roturas y sin ellas en el análisis discriminante. Y a su vez favorece un aumento del área de los niveles definidos como más susceptibles en la zonación de la susceptibilidad, según los valores de la función discriminante. Si se utiliza todo el área de La Población para el análisis, el problema de la selección de las celdas sin roturas es el mismo que si se utiliza sólo la zona sur en el análisis, puesto que la selección de estas celdas se realiza al azar. Pero la diferencia radica en la probabilidad de seleccionar celdas realmente estables, probabilidad que aumenta considerablemente si se utiliza todo el área debido a su heterogeneidad.

Desde este punto de vista, a nuestro entender, y puesto que el método propuesto define la muestra de celdas a analizar al azar, sin definir a priori celdas realmente estables, el mapa obtenido analizando todo el área de La Población puede dar una visión más real de la susceptibilidad.

Un factor en contra de esta conclusión es la distribución de la intensidad de lluvia que se interpreta como homogénea para realizar el análisis. Aunque esta premisa se utiliza aquí como hipótesis de trabajo para llevar a cabo la estimación de la susceptibilidad, es obvio que cuanto mayor sea el área de estudio menor será la probabilidad de homogeneidad de la intensidad de la lluvia. En este sentido el utilizar todo el área de estudio actúa más como un inconveniente, que el utilizar sólo la zona sur.

#### Influencia de la ponderación de las variables categóricas

Las variables categóricas utilizadas en los análisis son el espesor de la formación superficial, la presencia de ésta y la densidad de vegetación/ usos del suelo (GROSOR, FMS y VEG respectivamente). Cuando se utiliza la variable GROSOR no se utiliza FMS dado que esta última es una simplificación de la primera. Como se observa de los resultados obtenidos hasta el momento, estas variables aparecen siempre en la función discriminante final y con poder discriminante elevado en el caso de la variable GROSOR.

Para evaluar la influencia de la ponderación de éstas variables en los resultados del análisis y los errores derivados de una ponderación incorrecta, se han recodificado los valores de algunas de las categorías de estas variables siguiendo la misma interpretación utilizada en los análisis previos. Únicamente se aumenta el rango de valores de cada variable acentuando la importancia de algunas categorías frente a su papel en la estabilidad/inestabilidad de las laderas.

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en la Población de Lillet. La tabla 3.38 muestra las ponderaciones utilizadas.

CATEGORIAS	Ponderación previa	Anali. Sensibilidad Ponderación acent.	Anali. Sensibilidad Sin ponderación
<b>GROSOR</b>			
Roca	1	1	1
Espesor form. sup. 0-0.5 m	2	4	2
Espesor form. sup. > 0.5 m	4	12	3
<b>VEGET</b>			
Sin vegetación	1	1	1
Prado natural	6	6	2
Prado antrópico, terrazas, cultivos	12	12	4
Bosque bajo , matorral	9	9	3
Bosque abierto	12	12	4
Bosque denso	15	20	5
Ríos, cicatrices, minas	1	1	1

Tabla 3.38: Ponderaciones de las variables categóricas utilizadas. Se puede observar las ponderaciones utilizadas hasta el momento (ponderación previa) y las ponderaciones utilizadas en los análisis de sensibilidad (ponderación que acentúa la diferencia entre categorías y valores sin ponderar, simplemente ordenados de mayor a menor susceptibilidad o a la inversa).

#### Resultados de la ponderación

Utilizando la ponderación que acentúa el rango de valores en las variables GROSOR y VEG, se ha realizado todo el análisis estadístico para verificar la influencia de la ponderación en los resultados.

Los resultados del Análisis Factorial de Componentes Principales son muy similares a los obtenidos con la ponderación previa utilizada. Por tanto, la dependencia entre variables no varía al ponderar las categóricas con distintos valores, dado que la relación entre variables no depende de los valores que tengan (en el caso de las categóricas) si no de las categorías existentes y su relación con otras variables.

La tabla 3.39 muestra los resultados del test One-Way. Como puede observarse y es de esperar, la relación entre las variables y la estabilidad si que puede variar al cambiar la ponderación de las categorías de las variables. En este caso, al aumentar la diferencia de valores para acentuar la diferencia de las categorías frente a la estabilidad de las laderas, permite aumentar la diferencia entre las dos poblaciones (celdas con roturas y sin ellas) lo que favorece el poder discriminante de estas variables. En la tabla 3.39 se observa que la variable GROSOR ha aumentado ligeramente su poder discriminante frente a la ponderación utilizada en los análisis previos, mientras que la vegetación ha aumentado notablemente su relación con la variable de agrupación (con rotura o sin rotura de ladera) con la nueva ponderación.

VARIABLE	Ponderación inicial		Ponderación acentuada	
	F	Sig.	F	Sig.
<b>GROSOR</b>	103.2	0.000	105.009	0.000
<b>VEGET</b>	2.8	0.095	8.573	0.004

Tabla 3.39: Resultados del test One-Way de varianzas múltiples utilizando distintas ponderaciones para las variables categóricas.

Para el análisis discriminante se han seleccionado las mismas variables que en los análisis con la ponderación inicial. Los resultados de la función discriminante seleccionada se

muestran en la tabla 3.40. Las variables seleccionadas por la función, así como el resto de parámetros de la función (controles estadísticos) y resultados (coeficientes, centroides de las dos poblaciones) muestran una gran semejanza con los obtenidos por la función con la ponderación inicial utilizada.

El mapa de susceptibilidad creado a partir de la función discriminante (ver figura 3.40) y el índice de densidad relativa para validar el resto de celdas no utilizadas en el análisis (ver tabla 3.41) presentan unos resultados muy parecidos a los obtenidos con la ponderación inicial.

Los resultados hasta aquí obtenidos, y para la Población de Lillet, nos permiten deducir que la ponderación de las variables categóricas no influye en los resultados finales, o en todo caso, influye muy poco. Parece que el variar la ponderación influye en los resultados de los test que analizan la relación de las variables (cada una de forma independiente) con la estabilidad (el T-Test y el Onwe-Way) pero no ocurre lo mismo con el análisis discriminante ni con los pasos siguientes a éste (mapa de susceptibilidad y índice de densidad relativa utilizado para validar la función). En el caso del análisis discriminante, al considerar éste, mediante la función discriminante, la combinación de varios factores simultáneos, reduce de alguna manera el poder discriminante de las variables por separado. Ello se observa claramente en el caso de las categóricas al variar la ponderación de sus distintas clases acentuando la distancia entre clases o reduciéndola, sin modificar de forma clara los resultados finales de la función discriminante ni del mapa de susceptibilidad.

VARIABLES	COEFICIENTES DE LA FUNCIÓN	
	Estándar	No estándar
PEND	0.832	0.109
GROSOR	0.65	0.187
PENDM	-0.431	-0.038
PLA	-0.326	-0.249
MDE	-0.317	-0.002
LONG	0.296	0.364
VEG	-0.292	-0.050
Constante		-1.449

EIGENVALUE	WILKS-λ	χ <sup>2</sup>	PROB. %	CLASIFICACION (F = 0)
0.690	0.592	164.003	0.000	General 81.5 % Parcial (estable/inestable) 74.6% / 90.1%

Tabla 3.40: Resultados de la función discriminante seleccionada de La Población de Lillet.

Utilizando valores de orden creciente o decreciente para las variables categóricas, pero sin ponderar o dar distancias entre clases se obtienen resultados muy similares a los obtenidos hasta aquí, comprobándose que la ponderación no influye aparentemente en la estimación de la susceptibilidad. Resultados similares se han obtenido con esta nueva ponderación si se comparan con la anterior, analizando únicamente la zona Sud de la Población de Lillet, aunque no se presentan aquí. De la misma manera, se ha llevado a cabo el mismo análisis en Vallcebre con la nueva ponderación de la variable VEGET utilizada en la Población de Lillet y con nueva ponderación para FMS (acentuando la diferencia entre roca y existencia de formación superficial). Los resultados obtenidos en Vallcebre son casi idénticos a los

obtenidos previamente con la ponderación inicial, no presentándose aquí, y confirmando la poca influencia que tiene la ponderación de las variables categóricas en los resultados finales.

<b>ÍNDICE DE DENSIDAD RELATIVA</b>			
<b>Nivel de susceptibilidad</b>	<b>Nº de mov.</b>	<b>Nº de celdas</b>	<b>Índice</b>
<b>Muy baja</b>	0	226	0.000
<b>Bastante baja</b>	0	6118	0.000
<b>Baja</b>	1	55339	0.207
<b>Moderada</b>	17	74271	2.619
<b>Alta</b>	98	39306	28.526
<b>Bastante alta</b>	12	2000	68.648
<b>Muy alta</b>	0	49	0.000

Tabla 3.41: Resultados del índice de densidad relativa obtenido del análisis con la ponderación acentuada para las variables categóricas en La Pobra de Lillet.

Los análisis de sensibilidad realizados y presentados en esta memoria son una parte de los posibles análisis de sensibilidad que se pueden llevar a cabo. En este sentido, cabe comentar el estudio que se está llevando a cabo para evaluar la influencia de la muestra aleatoria seleccionada en los resultados, tanto del análisis estadístico (función discriminante), como del mapa de susceptibilidad final y su validación mediante el índice de densidad relativa. Los resultados obtenidos hasta el momento, limitados al análisis estadístico y al valor del parámetro estadístico Lambda de Wilks de la función discriminante, muestran que existe baja variabilidad en el valor del parámetro obtenido. Ello parece indicar, en cuanto a los resultados del análisis estadístico, que la selección de la muestra aleatoria ejerce una baja influencia. De la misma manera también se está llevando a término el estudio de la influencia del tamaño de la muestra aleatoria en los resultados del análisis estadístico y del mapa de susceptibilidad. Estos estudios, en curso, no se presentan en esta memoria.



- LA POBLA DE LILLET (Barcelona) -

## MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A LA ROTURA DE LA LADERA POR DESLIZAMIENTOS SUPERFICIALES

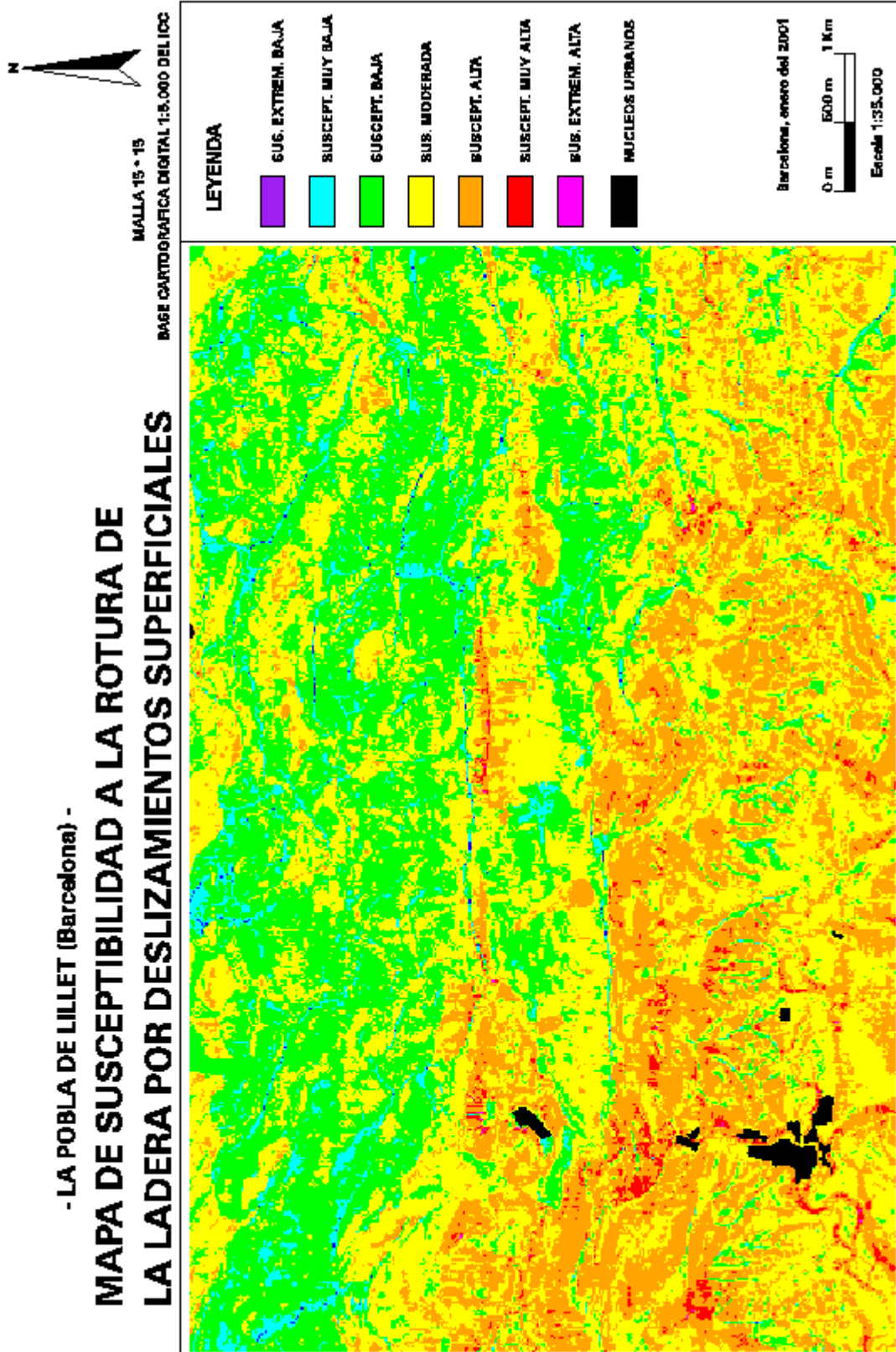


Figura 3.40: Mapa de susceptibilidad a los deslizamientos superficiales de la Pobla de Lillet con ponderaciones distintas para VEGET y GROSOR.