

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN Y CARTOGRAFÍA DE LA FRAGILIDAD EROSIVA

María Jesús Perles Roselló

Departamento de Geografía. Universidad de Málaga.
Campus de Teatinos, s/n. 29071 Málaga

Resumen: El artículo resume los principales pasos para la estimación y plasmación cartográfica del concepto de fragilidad erosiva. La fragilidad erosiva se define como la tendencia al desequilibrio erosivo que presenta un territorio en función de sus características físicas. Para su estimación, se parte del balance entre los conceptos de estado, riesgo, velocidad y tolerancia.

Palabras clave: erosión, fragilidad erosiva, cartografía, SIGs.

Abstract: The aim of this paper is resume the main steps in estimating and mapping the notion of erosive fragility. This concept is defined as the trend to erosive unestability that a territory shows due to its physical features.

Key words: erosion, erosive fragility, mapping, GIS.

1. INTRODUCCIÓN

En el panorama actual de la investigación en torno al tema erosivo, puede observarse como existen dos vías de enfoque del tema que protagonizan y sintetizan el trabajo en este campo. Tomando como muestra ilustrativa los proyectos de investigación asociados a los programas de la CE EPOCH o Environment para el área mediterránea, se pueden encontrar proyectos identificables con dos grandes líneas de acercamiento al problema erosivo.

Una de las líneas prioritarias es la ocupada por la tarea de indagación acerca del funcionamiento del proceso erosivo en las condiciones ambientales mediterráneas. Así, gran parte de la investigación se centra en la puesta al día, mediante procedimientos empíricos, de la información correspondiente a tasas de erosión y papel de las distintas variables que se relacionan con el proceso erosivo, para de esta manera, proceder al ajuste y calibración de modelos generales de predicción, o a la propuesta de nuevos modelos de funcionamiento.

Estos procedimientos, por su propia naturaleza, se fundamentan en la medición y observación directa sobre el terreno, y para la obtención de resultados precisos y abarcables, han de ser muy concretos en lo que a su representación espacial se refiere. Igualmente, para llegar a obtener una información fiable desde el punto de vista estadístico, se requiere un período de tiempo considerable. Por las mismas razones de precisión, los objetivos temáticos también se constriñen a ámbitos muy específicos, intentando, al aislar aspectos de estudio individuales, controlar comportamientos de las variables y resultados obtenidos (1).

De este modo, los resultados de este tipo de investigación puntual y específica presentan las limitaciones de su representación espacial restringida, y de la dispersión de los aspectos puntuales de la erosión que trata. Por este motivo, sus resultados adquieren verdadero sentido cuando se unifican con los procedentes de otros ámbitos espaciales y temáticos, lo que permite la comparación de datos y comportamientos y la integración progresiva en modelos de comportamiento de la erosión más amplios.

Si entendemos las aportaciones de investigaciones puntuales como un paso previo al posterior y más definitivo de comparación, calibración y extrapolación de resultados y formas de funcionamiento, hay que concluir que todo este proceso conlleva un largo período de reflexión, un dilatado proceso de ajuste.

Para esta fase, en lo que se refiere a la unificación de los resultados, la principal condición previa es la estandarización de las mediciones de campo y el análisis de datos para armonizar la comparación y extrapolación de los mismos. Respecto a la unificación de distintos aspectos temáticos de la erosión, el programa Environment, ya en su fase de llamada de 1991/92, reclama la necesidad de realizar un enfoque más interdisciplinar, como vía para conectar los resultados aislados por su especificidad, y de este modo hacerlos útiles, rentables desde el punto de vista de la actuación.

En lo que se refiere al segundo nivel de acercamiento al que se hacía mención anteriormente, existe una serie de trabajos que analizan el problema

a una escala mucho menos detallada (nivel regional, nivel nacional), apoyándose en las técnicas posibilitadas por los SIGs o la teledetección, para el control de la erosión (2).

Entre ambos niveles de acercamiento, tienen que trabarse una serie de conexiones que permitan la espacialización de los resultados obtenidos en el nivel de acercamiento a microescala, y que faciliten la cartografía del proceso erosivo a distintas escalas (3). En este punto, dos problemas surgen como esenciales: Por una parte cabe cuestionarse la representatividad real de datos obtenidos mediante experimentos muy puntuales, y con porcentajes de error intrínsecos (parcelas, sistemas de medición, dificultad para separar la influencia de distintas variables), tanto a la hora de plasmar modelos, como a la de espacializar resultados. Por otra, en el otro extremo, las unidades de diagnóstico aportadas para la regionalización suelen ser muy poco detalladas, y el procedimiento utilizado para elaborarlas, no siempre es muy minucioso, confundiéndose a veces el nivel general de la escala, con una mayor laxitud y vaguedad en los planteamientos de trabajo.

De este modo, el salto entre el micro y macro detalle puede causar grandes desajustes. Si el resultado de la investigación se resuelve en una cartografía de grandes posters, la información no contiene más que un interés divulgativo, sin que pueda utilizarse para la toma de decisiones, quedando en definitiva desconectada la investigación respecto a la acción. Estos problemas son también objeto de análisis y reflexión en proyectos tales como el EVSV-0166 (Research and Policy Interfacing in selected regions).

Para orientar los resultados de investigación a la acción sobre la erosión, es necesario elaborar documentos cartográficos operativos, tanto por su escala como por su propia concepción.

Para que la cartografía resulte operativa para la actuación, ha de elaborarse a una escala detallada, que permita un control directo sobre el territorio, pero que no se restrinja a lo puntual.

En lo que respecta a la concepción de la cartografía, existe una tarea previa en la que es necesario filtrar la información que si bien tiene sentido en el ámbito de la investigación sobre el proceso erosivo, no es determinante para la actuación. Esta tarea pasa por la determinación de umbrales e intervalos en los parámetros que sean expresivos y discriminantes, así como por una tendencia hacia la cualificación a la hora de gradar los conceptos. Piénsese, a la hora de determinar en qué áreas es más urgente la necesidad de controlar la erosión ¿tiene sentido (en un contexto de actuación, no de calibración de modelos) extremar la atención en la precisión de los datos, cuando la información ha de resumirse necesariamente en unos pocos intervalos que permi-

tan gradar la necesidad de actuación? ¿No se trata en este contexto de una información superflua y extremadamente costosa en tiempo y esfuerzo?

Es necesario igualmente una vez analizados de forma individual los distintos aspectos que la erosión engloba, para así profundizar en su análisis, unificarlos finalmente en un estimador sintético, que resulte expresivo de la erosión en su conjunto, no de aspectos específicos. Piénsese, por ejemplo, qué sentido tiene ofrecer como resultado de la investigación datos absolutamente precisos sobre pérdida de suelo de un territorio, si no consideramos a la vez otros aspectos como cuánto puede perder, o cuánto ha perdido ya.

Este es un punto esencial en un panorama en el que la multiplicidad de líneas de investigación específicas propicia una cierta dispersión, generándose resultados poco operativos, por parciales, hacia las políticas de actuación.

En este contexto, la propuesta cartográfica que se recoge a continuación pretende situarse en un nivel de conexión, tanto por la escala de trabajo, como por la síntesis e interrelación de aspectos diversos de la erosión que aúna y sintetiza.

2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA PROPUESTA CARTOGRÁFICA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA FRAGILIDAD EROSIVA

El objeto final de la propuesta es la estimación y cartografía de la fragilidad erosiva, concepto que hemos definido como el grado de tendencia al desequilibrio erosivo que presenta un territorio en función de sus características físicas.

Se ha perseguido ofrecer una propuesta de documentos cartográficos completa, que permita una espacialización de los resultados precisa, y además no apriorística, sino deducida de una elaborada estrategia de análisis que refleje la complejidad temática y espacial con la que el problema erosivo se manifiesta.

A la vez, entendemos que la disección y consideración de múltiples aspectos, debe conducirse, si queremos conseguir documentos operativos, hacia un concepto último que sea sintético, que por si solo, pueda expresar el asunto clave, que en este contexto sería saber dónde el problema es más grave, para saber donde hay que actuar con más urgencia. Este es el concepto que nosotros aportamos como grado de fragilidad erosiva.

La metodología, diferencia cuatro aspectos de la erosión, el estado de erosión que presenta el terreno, el riesgo de erosión que este posee, la velocidad a la que la erosión se produce, y la tolerancia frente a la erosión que

el terreno presenta. Cada uno de estos aspectos es analizado y estimado individualmente, y para cada uno de ellos se obtendrá un resultado final cartográfico. A la vez, cada uno de estos documentos constituye un producto intermedio a partir de los cuales se calculará y obtendrá el documento de fragilidad erosiva, resultado final de la metodología.

En definitiva un área será más frágil cuando por acumulación, por ejemplo, de un estado de erosión degradado, un alto riesgo de erosión, una alta tasa de velocidad de pérdida de suelo y una escasa tolerancia a soportar la erosión, su tendencia al desequilibrio sea manifiesta, y su necesidad de protección urgente.

Contextualizando la propuesta en el marco de líneas metodológicas que resumíamos en la introducción, se aborda el estudio del funcionamiento interno del proceso de erosión, pero intentando, al utilizar una escala de aproximación menos detallada de la que es habitual en los estudios que tratan este tema, solucionar el problema de las dificultades de extrapolación (puesto que la escala nos ha permitido hacer uso de información continua). La información ha sido recopilada a una escala intermedia de trabajo (en torno a una escala de proyecto, documentos entre 1:50.000 y 1:10.000, con salida final cartográfica a 1:50.000). La escala ha sido especialmente detallada a la hora de analizar variables de naturaleza topográfica (la unidad básica de referenciación es la ladera).

Para afrontar el problema de la lentitud de obtención de resultados, hemos optado por la utilización, además de una escala de trabajo menos afinada que la de estricto detalle, por el uso de fuentes indirectas elaboradas por especialistas, para observar sus posibilidades a este nivel de escala, limitándose en gran medida el trabajo de campo.

La fuente básica utilizada ha sido la fotografía aérea; hemos hecho uso también fuentes cartográficas múltiples, tanto de carácter topográfico como temático, y fuentes no cartográficas como los datos termométricos y pluviométricos para la elaboración de las variables climáticas, y en último término, datos directos de trabajo de campo. El trabajo y medición de campo se ha utilizado para la elaboración de la metodología, pero se ha pretendido que esta fuente no sea imprescindible para la aplicación de la misma.

La escala de aproximación, junto al análisis fundamentado en la fotografía aérea, ha permitido un nivel permanente de control sobre el territorio.

Antes de pasar a explicar qué pasos se han seguido para la elaboración de los documentos cartográficos representativos de cada uno de los aspectos individuales, hay que hacer una primera referencia a los dos procedimientos fundamentales que han permitido la estrategia metodológica. Estos procedi-

mientos han sido el análisis espacial posibilitado por un Sistema de Información Geográfica y el análisis estadístico mediante técnicas variadas, especialmente el uso de métodos de análisis multivariante.

Respecto al uso del SIG, si consideramos el carácter georreferenciado del fenómeno erosivo, unido al carácter multivariable de la erosión, y teniendo en cuenta que la mayor parte de los documentos cartográficos que la metodología propone como resultado provienen de la combinación de otros primarios, hay que concluir que la elaboración de la misma hubiera sido imposible sin las posibilidades y prestaciones que el SIG oferta.

El otro procedimiento que se encuentra en la base de toda la propuesta metodológica es la utilización de técnicas estadísticas diversas para la organización del amplio volumen de información y de sus relaciones, esto es, para el análisis de un aspecto fundamental de la erosión, como lo es su carácter multivariante.

3. ELABORACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA REFERENTE AL ESTADO EROSIVO

El estado erosivo, según lo proponemos en nuestra metodología, se define como el grado de intensidad de los signos de erosión manifestado en un terreno y observados en una fecha concreta; en el caso que nos ocupa, el estado se refiere únicamente a signos de erosión hídrica.

Como signos de erosión hídrica hemos considerado distintos grados de incisión de formas de erosión lineal (surcos, cárcavas y barrancos), así como de erosión areolar, como es el caso de huellas marcadas en el paisaje por la erosión laminar y por la sedimentación.

Partiendo de estos signos, podemos diferenciar distintos aspectos al analizar el estado erosivo dependiendo de la actividad que presenten los signos, de su tendencia, o en razón del parámetro que utilicemos para estimarlo.

En razón de su actividad, se pueden distinguir signos activos frente a signos inactivos. Según sea la tendencia de esa actividad, se distinguen fundamentalmente signos sin tendencia a la estabilización frente a los signos con tendencia a la misma, distinguiéndose nuevamente entre los signos que presentan tendencia a la estabilización por causas positivas o por contra negativas. Todos en conjunto, sin embargo, configuran el concepto de estado de erosión, manifestando el grado leve o avanzado de la degradación de una zona.

Las matizaciones que la actividad o inactividad introduce, diferencia tipos de información de distinta utilidad en el contexto de la fragilidad erosiva.

Para la deducción de cuáles son los factores de riesgo que se asocian a una mayor intensidad de los signos, para poder establecer predicciones, habrá que partir de los signos de erosión que demuestren ser activos en la actualidad. En esta misma tarea de medición, el conocimiento de si existen signos de erosión con tendencia al estacionamiento de su dinámica, nos ayudará a matizar la evolución venidera de la erosión, puesto que pueden presentarse por ejemplo altos factores de riesgo sobre un área con tendencia intrínseca a la anulación de la actividad, con lo que la pérdida de suelo, a pesar del alto riesgo potencial, será escasa. Por último, el conjunto de todos los signos, con independencia de su dinámica, definen el estado de degradación de una zona, lo que permite matizar cuál será la tolerancia de la zona, fundamentándolo no sólo en la profundidad y naturaleza del suelo, sino también en el estado de degradación que este suelo presente como herencia de la actividad erosiva sobre él. En definitiva, la individualización de todos estos aspectos produce una diversa gama de documentos cartográficos que poseen distintas utilidades en el entramado de la evaluación de la fragilidad.

3.1. Pautas para la elaboración de la cartografía

El documento base para la producción de toda la serie cartográfica referente a la fragilidad es el *Mapa de signos de erosión*. Su función es la de representar el estado que presenta el terreno respecto a la intensidad con lo que ha sido modificado por los agentes de erosión, manifestada a través de la cantidad de signos de erosión hídrica por unidad de superficie.

La fuente utilizada para la localización y cuantificación de los signos ha sido la fotografía aérea a escala 1:30.000, con apoyo de la 1:18.000, escala que posibilita un detalle suficiente para la observación, a la vez que permite circunscribir una extensión de terreno representativa. La fase de la localización de los signos de erosión lineal fue precedida por una toma de referencias en el campo, al objeto de establecer modelos de referencia generales. La unidad de referenciación espacial fue la ladera. Los criterios para la detección y diferenciación de los distintos signos de erosión están recogidos con más detalle en Perles (1993/4).

La adición de los signos de erosión de distinta índole (lineal, laminar), y diferente significado (ablación, sedimentación), se realizó mediante un algoritmo que recogiera este hecho, y mediante unos coeficientes de ponderación que reflejaran la distinta importancia que posee cada signo en razón de su propia magnitud. Los coeficientes se basaron en la relación de proporción existente entre el área de las distintas secciones de cada uno de los cauces (surcos, cárcavas, barrancos), cuyas medidas estándar (Van Zuidam & Canelado, 1977), fueron calibradas y corregidas mediante un procedimiento de

muestreo y medición directa en el campo (Perles 1994). Los coeficientes definitivamente utilizados para la ponderación fueron los que se recogen en el cuadro 1, al igual que el algoritmo que se utilizó para la definitiva unificación de los signos en un sólo valor representativo del estado de erosión.

Cuadro 1. *Coefficientes utilizados para la ponderación de los signos de erosión y algoritmo de unificación.*

<i>SIGNOS DE EROSIÓN PONDERADOS</i>	
<i>Frecuencia de signos de erosión</i>	<i>Coefficientes</i>
+ Núm. de surcos/ladera	* Coeficiente (20)
+ Núm. de cárcavas/ladera	* Coeficiente (75)
+ Núm. de barrancos/ladera	* Coeficiente (150)
+ Erosión laminar (sí/no)	* Coeficiente (área* 1 cm)
- Sedimentación (sí/no)	* Coeficiente (área* 1 cm)

La digitalización y procesamiento mediante un SIG permitió la definitiva referenciación de los distintos parámetros a una unidad de superficie, habiendo sido corregido los valores de extensión de cada ladera en función de la pendiente, para así obtener su área real.

El siguiente paso lo constituyó la determinación del grado de actividad de los signos de erosión recogidos. Para esta tarea se utilizó el trabajo de campo, adoptando los criterios recomendados a tal efecto por FAO (1984).

En lo que se refiere al establecimiento de la tendencia de la dinámica erosiva, basándonos en criterios generales observados sobre el terreno, y en información bibliográfica (tendencia de la dinámica en función de la profundidad del suelo y de la cobertura de la vegetación, Perles 1996), identificamos áreas con distinto tipo de tendencia futura. Partiendo nuevamente de la información de base recogida en el *Mapa de signos de erosión por ladera y unidad de superficie*, pasamos a la estimación del volumen de sedimentos movilizado por cada uno de los signos de erosión, por lo que el paso esencial lo constituyó el cubicaje del volumen teórico de tierra movilizadora por los mismos, utilizando las mediciones tipo ya calibradas anteriormente. Calculado en razón de estas medidas el volumen de tierra para cada signo, se multiplicó el mismo por el número de signos presentes en la ladera, y nuevamente se relacionó con el área de la misma, generándose valores finales de m³/ha.

Por último se estimó el peso de este volumen cubicado, mediante la multiplicación del volumen por la densidad de las distintas litologías sobre las que se desarrollaban cada signo, por la ausencia, en el momento de la elaboración del mapa, de valores de densidad referidos al suelo.

Todos los parámetros citados fueron plasmados en los diversos mapas que constituyen nuestra propuesta para la estimación del estado de erosión de una zona, y pueden observarse en el cuadro 2. Puede hallarse un seguimiento más preciso de su elaboración y utilidades en Perles (1997).

4. ELABORACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA REFERENTE AL RIESGO DE EROSIÓN

4.1. Pautas para la estimación del riesgo

Basándonos en la definición de FAO (1984), el riesgo de erosión se define como la vulnerabilidad del terreno a ser erosionado en razón de las características físicas que lo conforman y de las condiciones naturales que le afectan.

Para la estimación del riesgo de erosión se ha procedido a la estimación estadística de las interrelaciones que se establecen entre las variables relacionadas con la erosión, aplicando para ello un modelo de regresión múltiple en el que la erosión se ha considerado la variable dependiente de un extenso conjunto de variables.

Cuadro 2. Propuesta cartográfica para el análisis del estado erosivo.

MAPA DE SIGNOS DE EROSIÓN				
Núm. surcos	Núm. cárcavas	Núm. barrancos	Erosion laminar	Sedimentación
<i>Ponderación</i>				
MAPA DE ESTADO DE EROSIÓN (cualitativo)				
<i>Según actividad de la dinámica erosiva</i>				
MAPA DE SIGNOS DE EROSIÓN ACTIVOS		MAPA DE SIGNOS DE EROSIÓN INACTIVOS		
MAPA DE SIGNOS DE EROSIÓN CON TENDENCIA AL ESTACIONAMIENTO	causas positivas			
	causas negativas			
<i>Medición del volumen</i>				
MAPA DE VOLUMEN DE TIERRA DESPLAZADA				
Volumen * densidad				
MAPA DE PESO DE TIERRA DESPLAZADA				

Mediante la aplicación de este modelo, pretendíamos, además de conocer mejor las relaciones establecidas entre las diversas variables y la erosión en nuestro ámbito de estudio, obtener el documento predictivo indicativo del riesgo de erosión, el *Mapa de predicción del estado de erosión*.

Para la elaboración de este documento, procedimos primero a la recogida de información referente a un extenso número de variables relacionadas a priori con la erosión, utilizando fuentes muy diversas, y habiendo partido de una referenciación bibliográfica a la hora de seleccionarlas. Se recogió y cartografió información sobre un total de 27 variables relacionadas con la erosión, que se recogen a continuación.

Para la estimación del riesgo deducido de la topografía:

-
- Porcentaje de pendiente de la ladera.
 - Longitud real de la ladera.
 - Forma del perfil de la ladera.
 - Desnivel de la ladera.
 - Superficie real de la ladera.
-

Para la estimación del riesgo deducido de la erodibilidad del suelo:

-
- Litología.
 - Permeabilidad.
 - Textura.
 - Porcentaje de arcilla del suelo.
 - Porcentaje de limo del suelo.
 - Porcentaje de arena fina y muy fina del suelo.
 - Índice de Bouyoucos.
 - Estructura.
 - Código referente a la erosionabilidad de la estructura.
 - Tipo de estructura.
 - Contenido de materia orgánica (carbono orgánico).
 - ph del suelo.
 - Pedregosidad superficial.
 - Grado de humedad del suelo.
 - Exposición de la ladera.
 - Agua útil para las plantas.
 - Agua útil para las plantas ponderada según la exposición.
 - Núm. de meses de déficit hídrico del suelo.
 - Cambios en la permeabilidad por motivo de incendio.
-

Para la estimación del riesgo deducido de la protección vegetal:

-
- Porcentaje de cobertura de la vegetación observado.
 - Usos del suelo.
-

Para la estimación del riesgo deducido de la erosividad de las lluvias:

-
- Porcentaje de probabilidad de lluvias superiores a 75 mm. (mes de máx. probabilidad para cada estación).
 - Porcentaje de probabilidad de lluvias superiores a 100 mm.
 - Porcentaje de probabilidad de lluvias caídas tras un período seco.
 - Porcentaje de probabilidad de lluvias generadoras de un exceso sobre la recarga superior a 100 mm.
-

El siguiente paso fue la digitalización de la base cartográfica para cada una de estas variables, su procesamiento a través de un SIG, y la generación de la base de datos correspondiente.

A continuación procedimos a la superposición de las capas de información referentes a todas estas variables junto a la correspondiente al mapa de signos de erosión activos. De este modo obtuvimos la estructura base, tanto espacial como de información para proceder al análisis estadístico.

Los pasos llevados a cabo para el análisis estadístico, pueden resumirse muy brevemente como sigue:

1. Descripción estadística general de la información.
2. Análisis de las relaciones entre las variables, analizando la matriz de correlaciones para el caso de las variables cuantitativas, y del análisis de la varianza para las cualitativas.
3. Definición, mediante análisis de componentes principales, de la estructura en factores subyacente en la información, como medio para evitar los problemas de colinealidad y redundancia en la varianza total.
4. Chequeo de la hipótesis de la erosión como variable dependiente, mediante la aplicación de distintos procedimientos de regresión múltiple (procedimiento recogido con más detalle en Perles, 1995a)
5. Utilización de otra estrategia alternativa a la regresión, como vía para la observación de la relación entre los diversos tipos de paisajes y los niveles de erosión. Esta estrategia consistió en elaborar agrupamientos de las variables de incidencia en el paisaje mediante análisis cluster, es decir, obtener unos paisajes tipo desde un punto de vista erosivo, y observar si existe una gradación lógica entre los distintos grupos o tipos, y los valores de estado erosivos que estos grupos presentan (Perles 1995b)

Como resultado del análisis estadístico, además de conocimientos descriptivos acerca del comportamiento de las variables en nuestra área de estudio,

obtuvimos, como ya se ha citado, diversos mapas de predicción del estado de erosión, es decir, indicativos del riesgo, y otros complementarios relativos a los factores de erosionabilidad del suelo y erosividad de las lluvias, o el resultante del análisis «cluster».

5. ELABORACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA REFERENTE AL ESTADO EROSIVO

El tercero de los aspectos de la erosión considerados para la estimación de la fragilidad erosiva es la velocidad de la erosión. Se ha entendido este concepto como la movilización de sedimentos por unidad de tiempo. Por las dificultades que entraña la medición directa de este aspecto al nivel de escala de trabajo que se ha utilizado, hemos recurrido para su estimación a un parámetro indicador de la velocidad potencial, el factor A de la USLE. Los problemas de calibración a los que está sujeto este modelo no aportan especiales dificultades a nuestro esquema de trabajo, puesto que, al basarse este último en la adición de amplios niveles de gravedad de cada concepto, no es tan importante el valor concreto de la pérdida de suelo, utilizándose este dato únicamente como un instrumento de discriminación de distintas zonas de gravedad.

La serie de mapas resultantes del estudio de la velocidad de la erosión han sido los correspondientes al factor A de la USLE, así como los referentes a los restantes factores de la ecuación, los factores K, L, S, y C.

Los pasos seguidos para la elaboración de estos documentos pueden resumirse en:

– Recogida de la información referente a todas las variables implicadas en el cálculo de los distintos factores.

Factor K: Erosionabilidad del suelo.

- Porcentaje en materia orgánica en el horizonte superficial.
 - Permeabilidad.
 - Porcentaje de arcilla.
 - Porcentaje de arena fina.
 - Porcentaje de limo.
 - Tipo de estructura.
-

Factor L S: Factor topográfico.

- Longitud real de la ladera.
 - Pendiente de la ladera.
-

Factor R: Erosividad de las lluvias.

- Precipitación máxima diaria con un período de retorno de dos años.
 - Valor medio interanual de la precipitación del mes más lluvioso.
-

Factor C.

- Usos del suelo.
-

- Digitalización, procesamiento a través del SIG, y superposición de las capas de estas variables.

- Extracción de la base de datos resultante y estimación, mediante una hoja de cálculo, de los distintos factores de la ecuación, para calcular definitivamente el factor A, o pérdida de suelo en tm/ha/año.

- Representación de cada uno de los factores, utilizando como base cartográfica la resultante de la superposición.

6. ELABORACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA REFERENTE A LA TOLERANCIA

El cuarto de los aspectos de la erosión considerados en la metodología para la evaluación de la fragilidad, ha sido la tolerancia frente a la erosión. Hemos considerado este concepto como la capacidad del suelo, en razón de su estado, naturaleza y profundidad, de soportar la erosión.

Frente a procedimientos más estrictos para la estimación de la tolerancia a la erosión, se ha considerado más operativo y ajustado al contexto general de la investigación, estimar la tolerancia en un grado cualitativo y mediante variables simples, facilitándose así la adaptación a la información procedente de fuentes indirectas. Las variables utilizadas para la evaluación de este aspecto fueron la profundidad del suelo, y la capacidad de edafización de la litología que sustenta el suelo. El documento cartográfico representativo de este aspecto de la erosión es el *mapa de tolerancia del suelo a la erosión*.

Para su elaboración se han seguido los pasos acostumbrados de recopilación y digitalización de las variables, procesamiento mediante sig, superposición, procediéndose como paso final a la definición de los grados de tolerancia de acuerdo con unos criterios específicos que se han desarrollado a tal efecto y que se especifican a continuación.

Para el establecimiento de los cinco niveles de grado de tolerancia del suelo a la erosión se ha procedido, en primer lugar, a la delimitación de cuatro niveles de profundidad del suelo, denotativos de unos niveles de tolerancia

para la zona que nos ocupa, que discurren desde el muy alto al muy bajo. el cuadro siguiente (cuadro 3) muestra esta gradación:

Cuadro 3. *Relación entre los niveles de profundidad y la tolerancia en la zona de estudio.*

<i>Profundidad (cm)</i>	<i>Grado de tolerancia</i>
0 a 10	Muy baja
10 a 30	Baja
30 a 50	Alta
50 y más	Muy alta

En segundo lugar, se han clasificado las litofacies presentes en nuestra zona de estudio en dos grandes grupos, atendiendo a la capacidad de edafización de cada una de las litofacies (alta o baja). El cuadro siguiente (cuadro 4) recoge la clasificación.

Cuadro 4. *Clasificación de las litofacies según su capacidad de edafización.*

<i>Litofacies</i>	<i>Capacidad de edafización</i>
Mármoles	BAJA
Calizas	
Pizarras	
Esquistos	
Margo calizas	ALTA
Margas	
Arcillas	
Brechas	

La obtención de la gradación definitiva en cinco clases se obtiene de la combinación presentada por ambas variables en cada una de las unidades espaciales resultantes de la superposición de ambas variables. Las posibilidades de combinación de los distintos intervalos, y el grado de tolerancia al que esa combinación da lugar, se muestran a continuación (cuadro 5):

7. UNIFICACIÓN Y BALANCE. LA FRAGILIDAD EROSIVA

El último aspecto tratado en el capítulo de metodología es el concepto de fragilidad erosiva. Este concepto se deduce del resultado del balance entre los distintos aspectos de la erosión tratados, esto es el estado, el riesgo, la velocidad y la tolerancia. Se trata por tanto de un concepto complejo, expresivo del grado de tendencia al desequilibrio que presenta un territorio en razón de la actividad erosiva.

Cuadro 5. Grado de tolerancia según la profundidad y la capacidad de edafización de las litofacies.

<i>Profundidad</i>	<i>Edafización</i>	<i>TOLERANCIA</i>
Muy baja	Baja	MUY BAJA
Baja	Baja	BAJA
Baja	Alta	MEDIA
Alta	Baja	
Alta	Alta	ALTA
Muy alta	Alta	MUY ALTA

La fragilidad es por tanto un resultando complejo que, sin embargo, en virtud de su capacidad de síntesis, transmite una idea directa y simplificada de la situación erosiva, constituyendo así un concepto altamente orientativo a la hora de ordenar el territorio.

El documento resultante del concepto de fragilidad es el *Mapa de fragilidad del terreno ante la erosión*. Para la elaboración de este documento final, hemos partido de los cuatro documentos resultantes de los aspectos de la erosión ya citados, como se recoge en el cuadro 6.

Cuadro 6. Cartografía implicada en el concepto de fragilidad del terreno frente a la erosión.

<i>Mapa cualitativo de estado de erosión signos de erosión ponderados)</i>		Estado
<i>Mapa de signos de erosión activos y activos con tendencia al estacionamiento</i>	<i>Mapa de signos de erosión inactivos</i>	
<i>Mapa de predicción del estado de erosión</i>		Riesgo
<i>Mapa de factor A (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo)</i>		Velocidad
<i>Mapa de grado de tolerancia del suelo a la erosión</i>		Tolerancia
MAPA DE FRAGILIDAD DEL TERRENO FRENTE A LA EROSIÓN		FRAGILIDAD

Para la elaboración del mapa de fragilidad, partimos de la superposición de estos cuatro documentos. Para la unificación final de la información contenida en cada uno de ellos consideramos el carácter agresivo o, por contra, protector, que cada uno de los aspectos de la erosión posee en el contexto de la dinámica erosiva, considerando agresivos los aspectos de estado, riesgo y velocidad, y protector la tolerancia.

Con este criterio calculamos un algoritmo que suma los aspectos agresivos de la erosión y resta por contra la tolerancia por su carácter protector.

Cuadro 7. Algoritmo utilizado para la estimación de la fragilidad erosiva.

FRAGILIDAD							
+	estado	+	riesgo	+	velocidad	-	tolerancia

Según este algoritmo, y considerando que cada uno de los aspectos está gradado mediante cinco niveles, y que cada intervalo es indicativo de un estadio de gravedad, el valor de la resultante para la variable fragilidad, será calculada como la adición, mediante el algoritmo expresado, de los valores de uno a cinco de intervalos de gravedad.

En atención al recorrido de los valores posibles de fragilidad, procedimos a establecer los intervalos que se recogen a continuación, y su correspondiente nivel de cualificación:

Grado 1 de fragilidad: < 0	Fragilidad muy baja
Grado 2 de fragilidad: $> = 0 < 5$	Fragilidad baja
Grado 3 de fragilidad: $> = 5 < 10$	Fragilidad media
Grado 4 de fragilidad: $> = 10 < 14$	Fragilidad alta
Grado 5 de fragilidad: $= 14$	Fragilidad muy alta

La delimitación de intervalos y la asignación de un adjetivo cualitativo que los cualifique (alto/bajo) se ha efectuado tomando como referencia la distribución de las distintas variables en nuestra experiencia concreta, pero intentando, no obstante, perfilar unos estadios que sean representativos al analizar otras zonas. La correspondencia entre los grados cualitativos de cada aspecto y el valor cuantitativo de las magnitudes reales que representan en los cuatro aspectos de la erosión tratados (estado, riesgo, velocidad y tolerancia), se recogen en Perles (1997).

8. EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA. CUENCA DEL RÍO ALCAUCÍN

Todos los pasos establecidos en la metodología han sido aplicados a las dos cuencas que constituyen nuestro área de estudio, obteniéndose como resultado final dos grandes grupos de documentos cartográficos cuyo análisis y comentario excede los límites de este artículo. Los mapas 1 al 5 son un ejemplo de la aplicación de los mapas componentes del concepto de fragilidad

a la cuenca del río Alcaucín, una de las subcuencas de cabecera del río Vélez, que se constituye como el principal colector del sector oriental de la provincia de Málaga.

La cuenca del río Alcaucín (cabecera del río Vélez) se articula esencialmente por las unidades que se citan a continuación:

- Corredor de Colmenar (franja sur de la cuenca), formado por materiales margo-arcillosos que discurren desde el trias al mioceno, y generan una morfología suave de pendientes moderadas.

- Sierra de Tejeda (sector oriental de la cuenca) amplia y masiva extensión de relieves abruptos y fuertes pendientes, formada por mármoles triásicos.

- Sierra de Alhama (franja de disposición este-oeste situada al norte de la cuenca), abrupto murallón de laderas rocosas formadas por materiales calizos y dolomíticos de edad jurásica.

9. REFLEXIONES FINALES

Analizando a modo de balance los resultados obtenidos en las distintas fases del trabajo, uno de los objetivos marcados ha sido el de observar las posibilidades de fuentes indirectas tradicionales para el trabajo sobre el tema de la erosión a una escala intermedia.

En este sentido, afirmamos las posibilidades múltiples de la fotografía aérea como fuente para el estudio de los procesos erosivos. Esta fuente, además de proporcionar un contacto muy directo con el paisaje y un control detallado de sus excepcionalidades, frecuentes en un medio tan heterogéneo como el de la montaña mediterránea, permite un nivel suficiente de detalle para la cuantificación y medición. A la vez, la escala utilizada (1:30.000/1:18.000), abarcar una extensión de terreno representativa.

En el mismo sentido, fuentes sencillas y de acceso tan directo como el mapa topográfico a escala 1:10.000, ha constituido una fuente aunque primaria, muy versátil, de la que hemos podido deducir con un muy buen nivel de detalle muchas variables fisiográficas relacionadas con la erosión.

En lo que respecta a la escala, el trabajo a escala 1:10.000 nos ha proporcionado un buen nivel de detalle que se ha hecho compatible con la posibilidad de abarcar una zona de proporciones aceptables, lo que no hubiera sido posible en un grado de aproximación excesivamente detallado. La escala utilizada, según nuestra experiencia, ha gozado de las ventajas aportadas por su carácter intermedio.

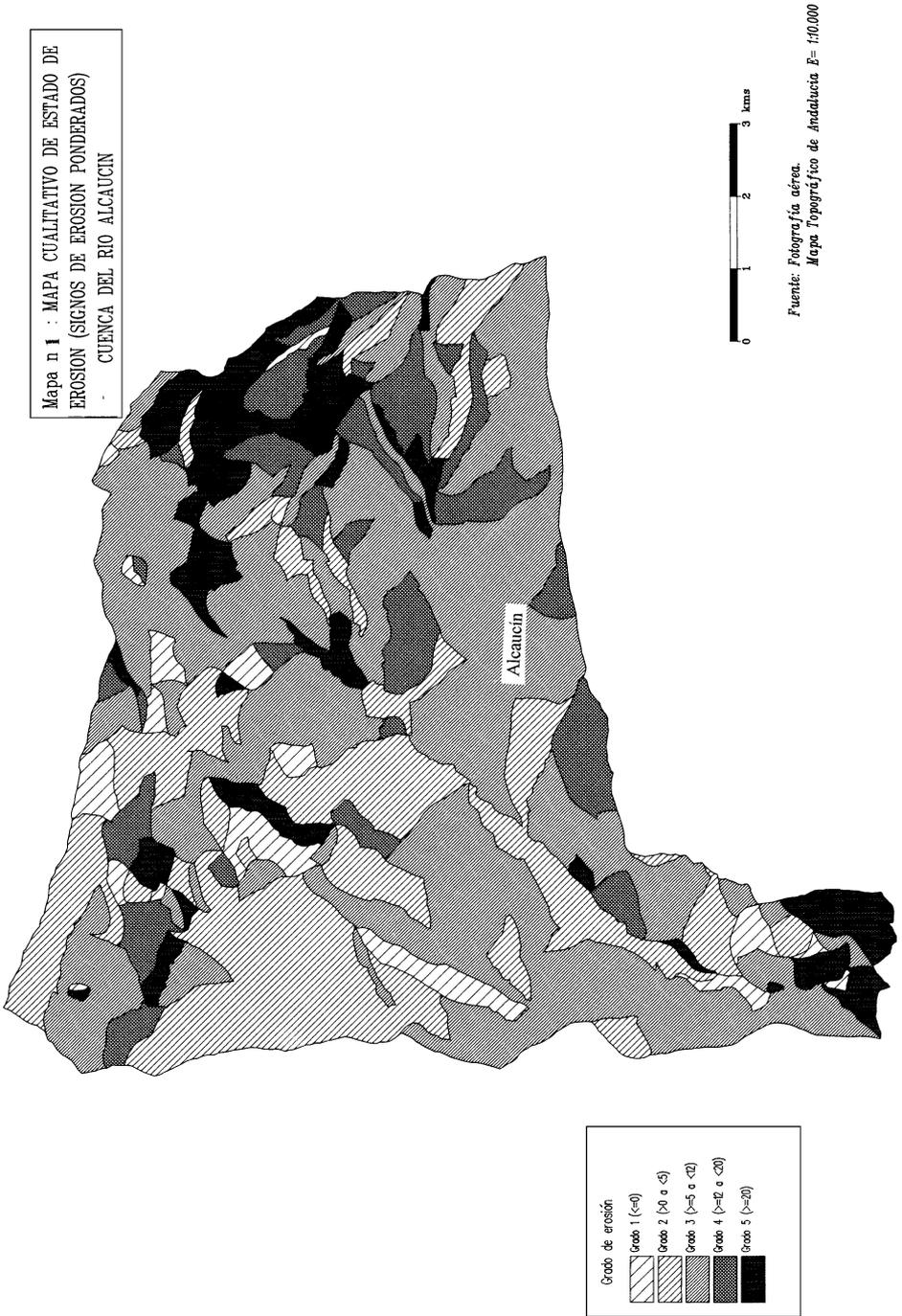


Figura 1: Mapa cualitativo de estado de erosión (signos de erosión ponderados). Cuenca del río



Figura 2: Mapa de predicción del estado de erosión. Cuenca del río Alcaucín.

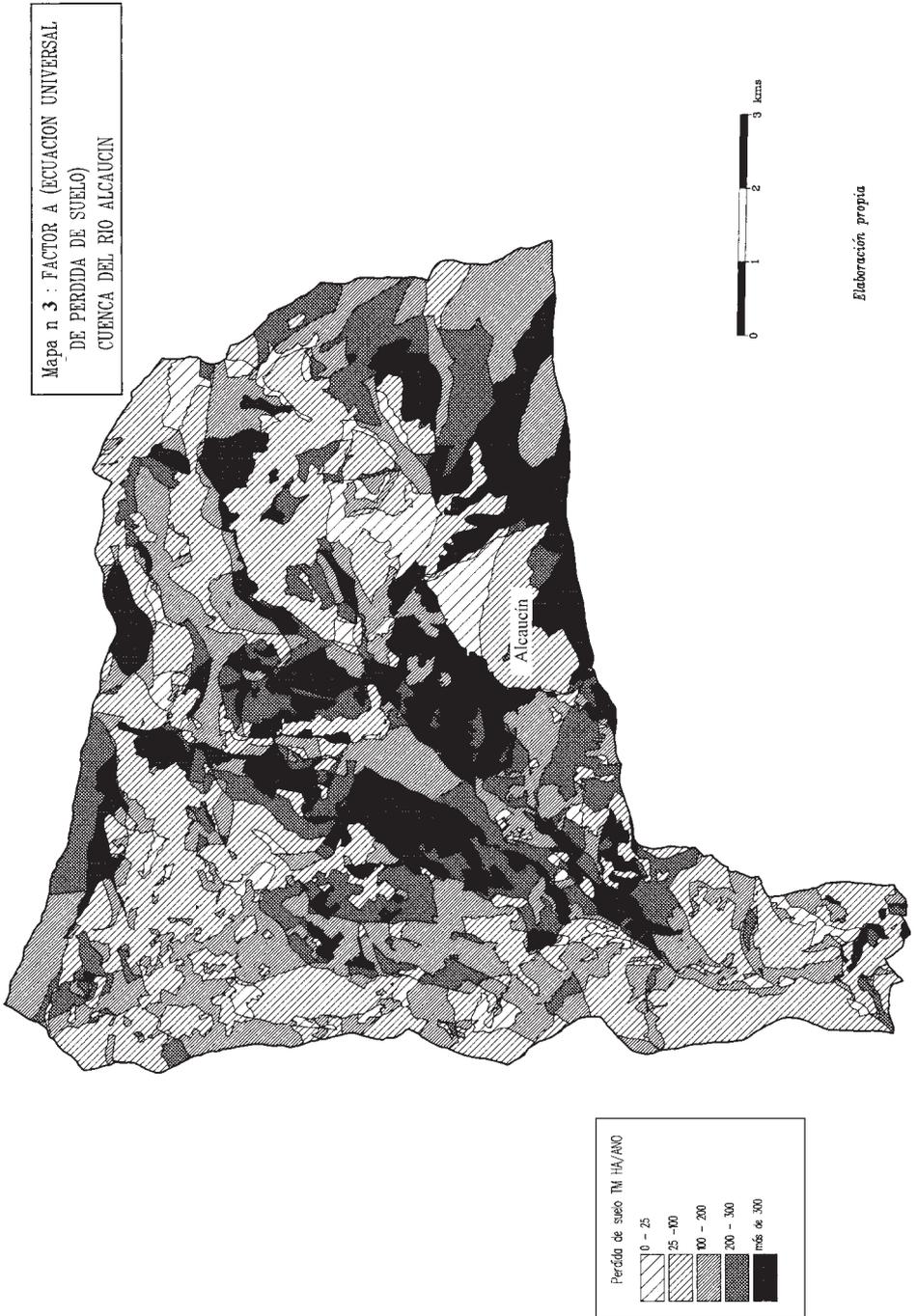


Figura 3: Mapa de factor A de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo. Cuenca del río Alcaucin.

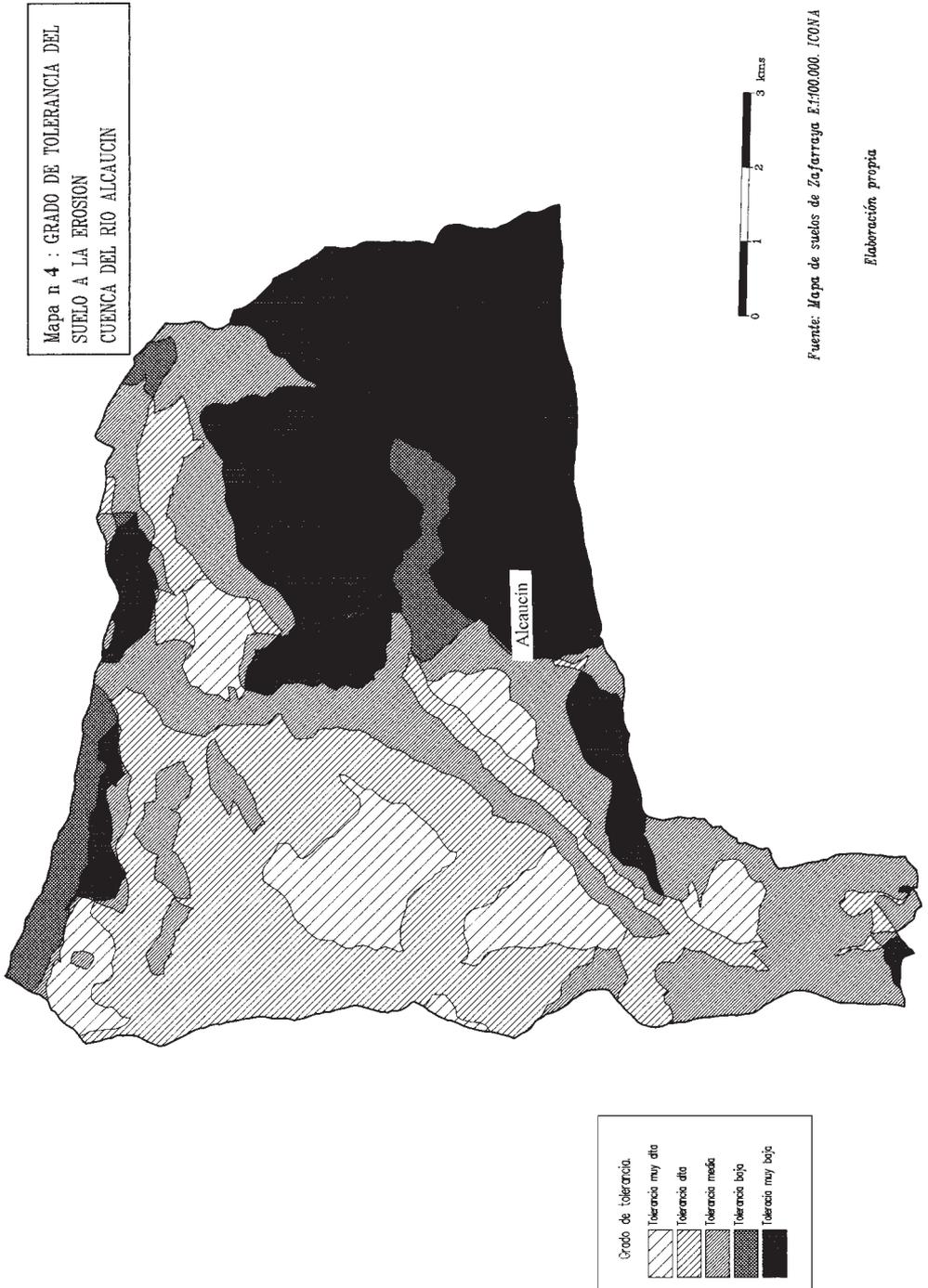


Figura 4: Mapa de grado de tolerancia del suelo a la erosión. Cuenca del río Alcaucín.

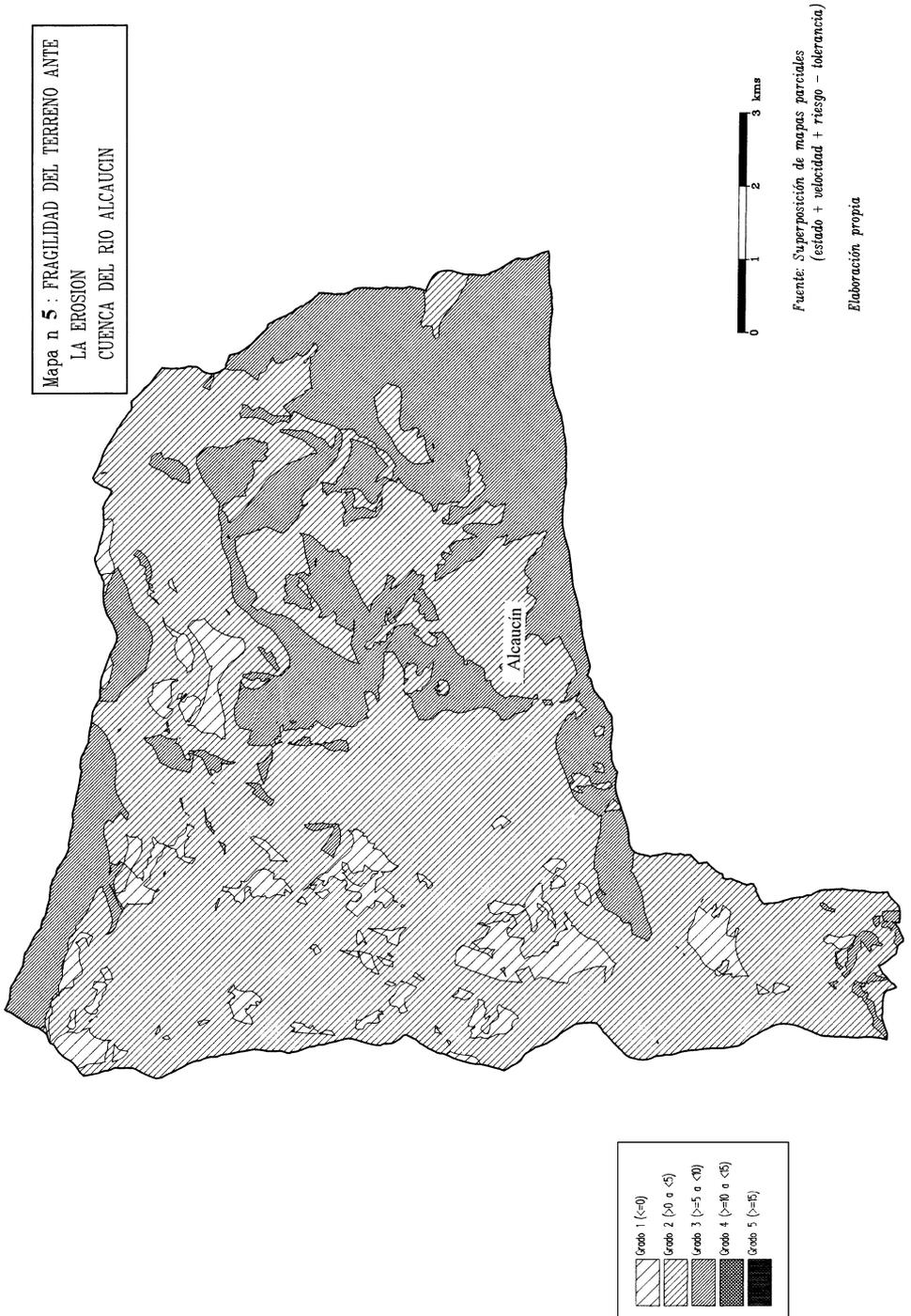


Figura 5: Mapa de fragilidad del terreno ante la erosión. Cuenca del río Alcaucin.

Cartográficamente, la representación se resuelve sin problemas utilizando una escala intermedia (1:50.000), en líneas generales de menor detalle que la utilizada para la mayoría de las variables, que no sólo aporta la más fácil aprehensión de la variabilidad espacial en su conjunto, sino que supone una buena proporción en la relación entre las escalas utilizadas como fuente y la escala de representación.

Sin embargo, junto a la información recogida a escala 1:10.000 se ha utilizado para la obtención de la mayor parte de las variables temáticas fuentes cartográficas elaboradas a una escala variable, pero en cualquier caso menos detallada (hasta 1:50.000). En otros casos, como el del clima, ha sido la naturaleza poco variable en un reducido ámbito espacial del aspecto tratado, el que ha proporcionado una cartografía poco diversificada, homogénea.

El principal problema aportado por la selección de estas fuentes, a la luz de la experiencia realizada, se ha manifestado concretamente en el objetivo de estimación del riesgo de erosión. En este punto, la superposición de fuentes con diverso nivel de detalle, ha significado en muchos casos una disparidad, a la hora del análisis estadístico, en la distribución de las variables, hecho que ha condicionado en gran parte del procedimiento.

En lo que respecta a la utilización del SIG, recogemos las grandes posibilidades de trabajo que nos ha brindado su uso en el procedimiento metodológico. Como muestra, piénsese en la posibilidad de superponer manualmente un total de variables como el utilizado considerando simultáneamente todos los casos existentes para cada una de las variables. En este sentido, creemos que el cambio que las nuevas técnicas de análisis espacial imprimen a la investigación en Geografía, más allá de un cambio cuantitativo en la calidad de los resultados y su representación, aporta un cambio cualitativo sustancial, puesto que abre una dimensión de posibilidades de estudio diferentes a las que habían sido tradicionales.

Consideramos que la propuesta cartográfica recoge el problema en una escala utilizable para la actuación, con una cobertura continua del territorio, y contemplando interrelacionadamente las distintas dimensiones del fenómeno de la erosión, así como su componente espacial y temporal. Por todo ello, la propuesta constituye una cartografía operativa y con capacidad de diagnóstico, útil en el contexto de urgencia en que se sitúa el fenómeno erosivo en nuestro ámbito mediterráneo.

En sentido contrario, el carácter general que va implícito en la intención globalizadora que hemos pretendido tiene como contrapartida el detrimento de la aportación de determinaciones concluyentes acerca de aspectos concretos y puntuales, objetivos más propios de estudios de mayor detalle y carácter más parcial. Sin embargo, junto a esta línea de trabajos más específicos, se

hace necesaria otra que, por su carácter más general y sus menores exigencias, permita una aplicación más efectiva de sus propuestas.

«The present gaps in knowledge, however, do not provide any excuse for delaying action to control on going land degradation in drylands» (El Ramblly, 1997).

NOTAS

- (1) Como ej. de este tipo de proyectos pueden citarse los siguientes: EVSV-0031; EVSV-0023; EVSV-0041; EVSV-0045; EVSV-0128.
- (2) Este nivel de acercamiento puede ejemplificarse en los proyectos EVSV-0029, O EVSV-0035.
- (3) Por ej., proyecto EVSV-0164.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- El Ramblly, I.** (1993/94): Desertification indices. Their assessment and impact on the development and management policies of marginal desert resources. *Paralelo 37*, 16, pp. 199-204.
- FAO-PNUMA** (1984): *Metodología provisional para la evaluación y representación cartográfica de la desertización*. Roma.
- Perles Roselló, M.J.** (1994/95): Aproximación metodológica a la evaluación del estado de erosión hídrica en el ámbito de la montaña mediterránea. Aplicación a la cabecera del río Vélez (Sistemas Béticos). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 20 y 21, 65-83.
- Perles Roselló, M.J.** (1994): Comprobación de una propuesta para la estimación teórica del estado erosivo (cuenca del río Vélez, Málaga). *Geomorfología en España*, III Reunión Nacional de Geomorfología. SEG, Zaragoza.
- Perles Roselló, M.J.** (1995 a): Comparación de distintos estimadores del riesgo de erosión. (Factor A de la USLE y ecuación de regresión múltiple. Cuenca del río Alcaucín. *Baética*, 17.
- Perles Roselló, M.J.** (1995 b): Cartografía de los paisajes erosivos a partir del uso de un SIG y de técnicas estadísticas multivariadas. *Cambios regionales a finales del siglo XX*, AGE. Dpto. de Geografía. Univ. de Salamanca.
- Perles Roselló, M.J.** (1996): Elaboración de mapas de tendencias de la dinámica erosiva. El pronóstico de la evolución de la erosión a partir de datos sobre el estado erosivo *Baética*, 18, 243-267.
- Perles Roselló, M.J.** (1997): *Medir la erosión. Cartografía de la fragilidad erosiva en el valle del río Vélez*. Ed. Diputación Provincial de Málaga (en prensa).
- Peter, D.** (1993/94): Overview of the EC research projects (EPOCH and Environment Programmes) in the field of desertification in the mediterranean area. *Paralelo 37*, 16, pp. 233-240.
- Van Zuidam, R.A. & Cancelado, F.** (1977): «Terrain analysis and classification using aerial photographie. A geomorfological approach». *I.T.C. Textbook of photo interpretation*. vol. VII. Netherlands
- Wischmeier, W.H. & Smith, D.D.** (1965): «Predicting rainfall erosion losses from Cropland East of the Rocky Mountains». *Agricultural Handbook*, 282. U.S. Department of Agriculture. Washington D.C.