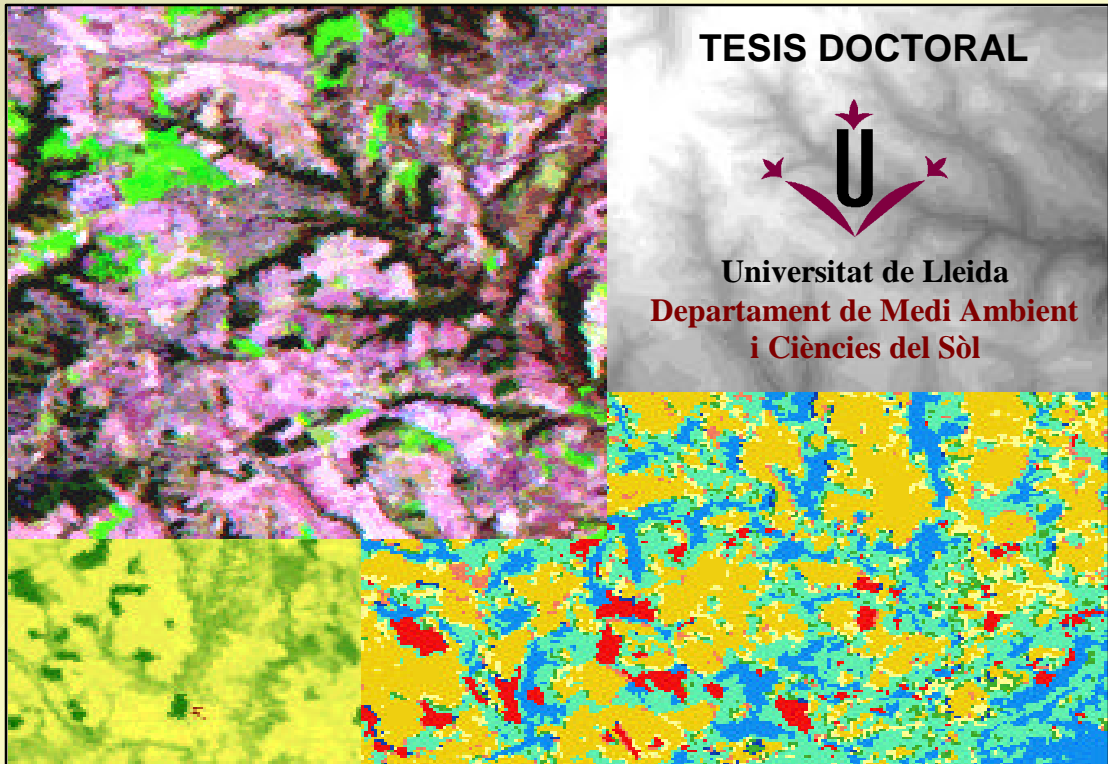


Suelo-Paisaje-Erosión. Erosión por cárcavas y barrancos en el Alt Penedès – Anoia (Cataluña).

Un enfoque de estudio mediante tecnologías de la información espacial:
Bases de datos, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección.



Soil-Landscape-Erosion. Gully erosion in the Alt Penedès – Anoia (Catalonia).

A spatial information technology approach: Spatial databases,
Geographical Information Systems and Remote Sensing.

José A. Martínez-Casasnovas

Lleida, septiembre de 1998



UNIVERSITAT DE LLEIDA
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària
Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl

**Suelo-Paisaje-Erosión. Erosión por cárcavas y barrancos en el
Alt Penedès – Anoia (Cataluña).**

Un enfoque de estudio mediante tecnologías de la información espacial: Bases de
Datos, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección.

**Soil-Landscape-Erosion. Gully erosion in the Alt Penedès –
Anoia (Catalonia).**

A spatial information technology approach: Spatial databases, Geographical
Information Systems and Remote Sensing

Memoria presentada por:

José Antonio Martínez Casasnovas

Para optar al grado de Doctor

Director: Prof. Dr. Jaume Porta i Casanellas

El director de la tesis,

El doctorando,

Lleida, septiembre de 1998

*A mis padres, Antonio y Pilar,
a mi hermana María Jesús,
y a Tere.*

RESUMEN

La presente investigación supone una contribución al desarrollo de metodologías que amplíen la aplicabilidad de los sistemas de información geográfica (SIG), la teledetección y las bases de datos al análisis del territorio. En concreto, la investigación se centra en el análisis de las relaciones suelo-paisaje, de las propiedades de los suelos y de los procesos de erosión hídrica, particularmente los procesos de erosión por cárcavas y barrancos. La investigación se desarrolla en las comarcas de l'Alt Penedès y l'Anoia (Cataluña), un área donde la viña para producción de vinos de alta calidad y cavas es el principal cultivo, pero donde la forma actual de los usos y manejo del suelo, con escasas medidas de conservación, condiciona la sostenibilidad futura de los presentes usos agrícolas.

Uno de los resultados principales de la investigación es el sistema de información de suelos (SIS), desarrollado a una escala semidetallada a nivel de toda el área de estudio. Este SIS ha permitido analizar la distribución espacial de los principales tipos de suelo, sus propiedades y su comportamiento frente a la acción de los procesos erosivos y actuaciones antrópicas. También, constituye la estructura sobre la cual poder desarrollar bases de datos espaciales de suelos más detalladas.

Otra de las aportaciones es el conjunto de metodologías, basadas en el análisis multitemporal de fotografías aéreas y de modelos digitales de elevaciones (MDE), en la clasificación multiespectral de imágenes de satélite y en operaciones de análisis espacial mediante SIG, conducentes al análisis de procesos de erosión por cárcavas y barrancos. La aplicación de estas metodologías al área del Alt Penedès – Anoia ha permitido confirmar la importante influencia de la acción antrópica en la aceleración de los procesos de erosión actual, que se ve reflejada principalmente en:

- a) las propiedades de los suelos, con la puesta en superficie de materiales de horizontes subyacentes ricos en carbonato cálcico, calcilutitas o areniscas,
- b) el análisis morfométrico y morfográfico de las geoformas, que muestra un modelado del paisaje con vertientes complejas y barrancos, y una alta densidad de cárcavas,
- c) el análisis de las tasas de erosión por cárcavas y barrancos, que han sido particularmente elevadas a partir de la deforestación generalizada con roturación de tierras para la plantación de viña a partir del siglo XVI, y sobre todo a partir de la mecanización de los cultivos.

La investigación realizada confirma la importancia de combinar técnicas de campo y laboratorio con las técnicas de teledetección para la adquisición de datos y conocimiento de los procesos de erosión, y con las técnicas de SIG con fines de modelización.

Palabras clave: Sistemas de Información Geográfica (SIG), Teledetección, Bases de datos espaciales, Sistemas de Información de Suelos (SIS), Relaciones suelo-paisaje, Erosión por cárcavas y barrancos.

SUMMARY

This research represents a contribution to the development of methodologies to extend the applicability of geographical information systems (GIS), remote sensing and spatial databases to terrain analysis, particularly soil-landscape relationships, soil properties and hydric erosion processes, and more specifically gully erosion processes. The research is carried out in the l'Alt Penedès y l'Anoia (Catalonia), an area where vineyards for high quality and "cava" production are the main crop, but where the present manner of soil use and management, with few control measures, determines the future sustainability of the present agricultural uses.

One of the main results of the present research is the soil information system (SIS), that contains semi-detailed scale information about the soils of the study area. It allowed the analysis of the spatial distribution of the main soil types, their properties and their behaviour in front of the actuation of erosion processes and anthropic transformations. Also, it constitutes the basic structure from which more detailed soil spatial databases can be developed.

Another contribution is the set of methodologies, based on the multitemporal analysis of aerial photographs and digital elevation models (DEM), multispectral classification of satellite images and GIS spatial analysis, that is addressed to the analysis of gully erosion processes. The application of those methodologies to the Alt Penedès – Anoia area revealed the important influence of the anthropic factor in the acceleration of the present erosion processes, that is observed through:

- a) the soil properties, with the presence on surface of materials that are rich in calcium carbonate, calcilutites or sandstones from subsurface layers,
- b) the morphometric and morphographic analysis of the geoforms, which shows a shape of the landscape with complex slopes and large gullies, and a high density of gullies,
- c) the analysis of the rates of gully erosion, that have been particularly high since the generalised deforestation to plant vineyards in the XVI Century and, above all, since the advent of mechanisation.

This research confirms the importance of combining field and laboratory techniques with remote sensing techniques for data acquisition and knowledge concerning the occurring erosion processes, and with GIS techniques for modelling.

Key words: Geographical Information Systems (GIS), Remote sensing, Spatial databases, Soil Information Systems (SIS), Soil-landscape relationships, Gully erosion.

RESUM

Aquesta investigació suposa una contribució al desenvolupament de metodologies que amplien l'aplicabilitat dels sistemes d'informació geogràfica (SIG), la teledetecció i les bases de dades en l'anàlisi del territori. En concret, la investigació es centra en l'anàlisi de les relacions sòl-paisatge, de les propietats dels sòls y dels processos d'erosió hídrica, particularment els processos d'erosió per xaragalls i barrancs. La investigació se porta a terme en les comarques de l'Alt Penedès y l'Anoia (Catalunya), una àrea on la vinya per a la producció de vins d'alta qualitat i caves és el principal cultiu, però on la forma actual de l'ús i maneig del sòl, amb escasses mesures de conservació, condiona la sostenibilitat futura dels usos agrícoles presents.

Un dels resultats principals de la investigació és el sistema d'informació de sòls (SIS), desenvolupat a una escala semidetallada a nivell de tota l'àrea d'estudi. Aquest SIS ha permès analitzar la distribució espacial dels principals tipus de sòl, les seves propietats i el seu comportament davant l'acció dels processos erosius i de les actuacions antròpiques. També constitueix l'estructura sobre la qual es poden desenvolupar bases de dades espacials de sòls més detallades.

Una altra aportació és el conjunt de metodologies basades en l'anàlisi multitemporal de fotografies aèries, de models digitals d'elevacions (MDE), i també en la classificació multiespectral d'imatges de satèl.lit i en les operacions d'anàlisi espacial mitjançant SIG, que conduexen a l'anàlisi de processos d'erosió per xaragalls i barrancs. L'aplicació d'aquestes metodologies a l'àrea de l'Alt Penedès – Anoia confirma la important influència de l'acció antròpica en l'acceleració dels processos d'erosió actual. Aquesta acceleració dels processos erosius es reflecteix principalment en:

- a) les propietats dels sòls, amb la posada en superfície de materials d'horitzons subjacents, rics en carbonat càlcic, calcilutites o arenisques,
- b) l'anàlisi morfomètric i morfogràfic de les geoformes, que mostra un modelat del paisatge amb vessants complexes i barrancs, i una alta densitat de xaragalls incipients,
- c) l'anàlisi de les taxes d'erosió per xaragalls i barrancs, que han estat particularment elevades des de la deforestació generalitzada amb roturació de terres per a la plantació de vinya, a partir del segle XVI, sobretot, a partir de la mecanització dels cultius.

La investigació realitzada confirma la importància de combinar tècniques de camp i laboratori amb tècniques de teledetecció per a l'adquisició de dades i coneixement dels processos d'erosió, i amb tècniques de SIG amb finalitat de modelització.

Paraules clau: Sistemes d'Informació Geogràfica (SIG), Teledetecció, Bases de dades espacials, Sistemes d'Informació de Sòls (SIS), Relacions sòl-paisatge, Erosió per xaragalls i barrancs.

Prefacio

La presente tesis representa el final una importante etapa, iniciada allá por el año 1992, de mi dedicación al estudio y aplicación de las tecnologías de la información espacial, como lo son los sistemas de información geográfica (SIG), la teledetección y las bases de datos, al análisis del territorio.

Tras una primera etapa, en la que el uso de estas tecnologías ha estado mayoritariamente orientado a la representación cartográfica, actualmente se han convertido en herramientas de uso cotidiano en el análisis integrado de la información territorial.

Estas tecnologías no hacen nada por sí solas, sino que necesitan de estructuras de datos y de procedimientos o métodos de análisis, que ensamblen las herramientas que se nos ofrecen, con el fin de resolver los problemas planteados de análisis espacial. En este sentido, el presente trabajo de investigación pretende ser una contribución al desarrollo de metodologías que amplíen la aplicabilidad de los SIG, la teledetección y las bases de datos al análisis del territorio, y en concreto al estudio de los suelos y los procesos de erosión hídrica, (en particular los procesos de erosión por cárcavas y barrancos). La investigación se centra en las comarcas de l'Alt Penedès y l'Anoia (Cataluña), un área donde la forma actual de los usos del suelo, con escasas medidas de conservación, condiciona la sostenibilidad futura de los presentes usos agrícolas.

Esta tesis se organiza en diferentes capítulos. En el capítulo 1 se exponen las características principales del área de estudio, con hincapié en los procesos erosivos existentes, la necesidad de información territorial y las metodologías para la adquisición y el análisis de la información del territorio. También, se presentan los objetivos generales de la investigación. En el capítulo 2 se presenta una síntesis de la geología del Alt Penedès – Anoia y el análisis de las geoformas, que es la base sobre la que se desarrolla y se estructura el Sistema de Información de Suelos (capítulo 3). A partir de este sistema se analizan las propiedades de los suelos en relación con los procesos de erosión hídrica. El capítulo 4 se dedica a la investigación y modelización de los procesos de erosión por cárcavas y barrancos que ocurren en el área de estudio. El capítulo 5 recoge, en diferentes secciones, distintas metodologías basadas en el uso de tecnologías de la información espacial (bases de datos, SIG y teledetección), que han servido para el desarrollo de los objetivos generales de la investigación. Las secciones de este capítulo constituyen diferentes publicaciones. Finalmente, el capítulo 6 presenta las conclusiones generales de la investigación.

Diversas personas y entidades han colaborado de una manera u otra en que esta tesis haya salido adelante, y a las cuales deseo expresar mi más sincero agradecimiento.

En primer lugar, quiero agradecer al **Prof. Dr. Jaume Porta** su particular visión de futuro, que me animó a adentrarme en este apasionante mundo de las tecnologías de la información espacial, y en particular en los SIG. También deseo agradecerle sus consejos, correcciones y discusiones como director de la tesis, que han enriquecido el contenido de la presente investigación.

Agradezco al **Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl** de la Universitat de Lleida, donde he desarrollado la parte principal de la investigación, y a todos sus miembros (mis compañeros), la colaboración y apoyo mostrados en todo momento. Al **Department of Geographical Information Processing and Remote Sensing**, Wageningen Agricultural University (Holanda), donde también he desarrollado parte de la investigación, bajo la dirección y consejo del **Prof. Dr. Martien Molenaar** y la inestimable colaboración del **Prof. John H. Stuver**.

Al **Prof. Dr. Peter Bullock**, de la **School of Agriculture, Food and Environment**, Cranfield University (Reino Unido) y al **Prof. Dr. Alfred Zinck**, del **Department of Land Resources and Urban Sciences, Soil Survey Division**, International Institute for Aerospace Surveys and Earth Sciences, Enschede (Holanda), por su participación como evaluadores externos de la presente tesis, así como por la atención recibida en todo momento.

Mi agradecimiento a la **CICYT** y **DGCYT**, que han financiado los proyectos de investigación en los cuales se ha desarrollado la tesis, y a la **CIRIT**, por las becas recibidas. Estas becas me permitieron ampliar mis estudios en el extranjero, realizando un master en sistemas de información geográfica en el ITC y la Wageningen Agricultural University (Holanda), y también llevar a cabo parte de la investigación relacionada específicamente con la presente tesis, durante 3 meses en la Wageningen Agricultural University.

Además, durante la realización de la investigación he contado con la colaboración de diversas personas a las cuales deseo expresar mi agradecimiento, como **Jaume Boixadera**, por sus enriquecedoras discusiones sobre el análisis de la información de suelos del área de estudio; **Jordi Roca**, por su colaboración en la descripción geomorfológica; **Carlos López** y **Josep M. Cervera**, que me ayudaron y acompañaron en los trabajos de campo de descripción de calicatas y de observación de los procesos de erosión por cárcavas y barrancos. A **Anika Meyer**, con quien he compartido las ideas sobre modelización del desarrollo de cárcavas, y a quien estoy muy agradecido por el interés y constancia mostrados durante su participación en la presente investigación. A **Montse Antúnez**, un especial agradecimiento, no sólo por su colaboración en los análisis de suelos, sino por su amistad, apoyo y ánimo en todo momento.

A **Teresa Estela**, pel seu suport, per la seva infinita paciència, pel seu somriure en els moments més difícils i per moltes altres coses.

Finalmente, quiero agradecer de forma muy especial y muy particular a mi familia y a mis amigos, su constante apoyo y el ofrecimiento desinteresado de colaboración en todo momento. Realmente vosotros, con vuestro apoyo, sois quien ha hecho posible que esta tesis vea la luz.

José A. Martínez Casasnovas

Lleida, septiembre de 1998

Tabla de Contenidos

| | |
|---|-----|
| Resumen | i |
| Summary..... | iii |
| Resum..... | v |
| Prefacio..... | vii |
| 1. Introducción general. | 1 |
| 2. Análisis morfométrico y morfográfico de geoformas en el Alt Penedès – Anoia. | 21 |
| 3. Suelos del Alt Penedès – Anoia: Análisis de las relaciones suelo-paisaje y Sistema de Información de Suelos. | 71 |
| 4. Gully erosion in the Alt Penedès – Anoia region (NE Spain): A remote sensing and GIS perspective for mapping and modelling..... | 135 |
| 5. Técnicas de teledetección, SIG y bases de datos espaciales para cartografía y modelización de suelos-paisaje-erosión. (Remote sensing, GIS and spatial database techniques for soil-landscape-erosion mapping and modelling). | 199 |
| 5.1. Obtención automática de relaciones espaciales en el análisis del territorio: Relaciones de adyacencia (vecindad) entre geoformas en el Alt Penedès – Anoia (Cataluña). | 201 |
| 5.2. A cartographic and database approach for land cover/use mapping and generalisation from remotely sensed data. | 221 |
| 5.3. Automatic delineation of drainage networks and elementary catchments from Digital Elevation Models. | 243 |
| 5.4. Prediction of existing gully erosion in vineyard parcels of the NE Spain: A logistic modelling approach. | 267 |
| 6. Conclusiones generales..... | 289 |
| Anejos. | 293 |
| Índice de tablas. | 335 |
| Índice de figuras. | 341 |
| Abreviaciones. | 351 |

1. Introducción general

1.1. Introducció

La presente investigació se enmarca dentro del Proyecto de investigació sobre el Control de la Erosió en Suelos de Viña de Producció de Vinos de Alta Calidad en el NE de España (CESVI), llevado a cabo por el Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl de la Universitat de Lleida a través de dos proyectos financiados:

- Efecto de las características de las lluvias y de las propiedades de los suelos en la erosió en viñedos de producció de vino de alta calidad en el NE de España: Modelizació y prognosis. (Proyecto CICYT, 1991- 1994).
- Energía cinética y erosividad de las lluvias en zonas vitícolas del área mediterránea (Anoia-Penedès): Modelizació de procesos erosivos por cárcavas y barrancos. (Proyecto DGICYT, 1995-1998).

Dentro del área mediterránea del NE de España, una de las zonas de mayor tradición en el cultivo de la viña es la constituida por las comarcas de l'Alt Penedès y l'Anoia, cuya producció de vinos y cavas se regula entorno a las Denominaciones de Origen *Penedès* y *Cava*.

En estas comarcas, los sistemas tradicionales de conservació de suelos y aguas han estado integrados en los sistemas de cultivo de la viña, frenando la erosió en un medio que, por sus características intrínsecas (precipitaciones, geomorfología, litología y suelos), tiene un alto potencial para la erosió hídrica.

A nivel de parcela, los procesos de erosió más comunes son la erosió por salpicadura, la erosió laminar difusa y la erosió por escorrentía superficial concentrada. Sin embargo, a nivel regional el rasgo fundamental del Alt Penedès-Anoia es la incisión de una densa y profunda red de cárcavas y barrancos, hecho que destaca en la observació de campo y de imágenes de teledetecció (Figura 1.1).

La erosió en el Alt Penedès – Anoia viene condicionada por procesos tectónicos que han tenido lugar a escala regional (Gallart 1981). Actualmente, el desarrollo e incisión de la red de drenaje continua, pero con una fuerte influencia de la actividad humana, especialmente por la gran extensión de los cultivos y por el abandono de las medidas tradicionales de conservació de suelos (Poch *et al.* 1996). Las consecuencias más graves repercuten en los recursos del territorio, y en particular en los suelos.

En el Alt Penedès – Anoia, diversos estudios previos a la presente investigació han puesto de manifiesto la necesidad de disponer de informació de suelos, con el fin de orientar mejor el uso del terreno. En primer lugar, la ocurrencia de intensos procesos de erosió hídrica condiciona la sostenibilidad del cultivo predominante: la viña. Ello exige informació de suelos a escala detallada o semidetallada, para poder priorizar las áreas de actuación ante la pérdida de suelo. En segundo lugar, la toma de decisiones debe llevar a proponer medidas de conservació de suelos y aguas a nivel de parcela. La mecanizació en la zona permite prever la transformació de las parcelas (movimientos de tierra y nivelaciones) en las nuevas plantaciones de viña, la cual exige informació de suelos a nivel detallado. Esta informació verá incrementada su utilidad en un sistema de

información de suelos (SIS), que permita al usuario y al gestor de la información un rápido acceso, mayor capacidad de análisis y la posibilidad de actualización.

Por otra parte, para el control de la erosión por cárcavas y barrancos, faltan estudios que integren cartografía de las áreas afectadas por estos procesos erosivos, su grado de erosividad actual y patrón de crecimiento de cárcavas a nivel de parcela, de desarrollo de los barrancos existentes, y la utilización de toda esta información. Estos estudios han de conducir a la predicción de áreas con potencial para la erosión por cárcavas y barrancos, y a la priorización de actuaciones en establecimiento de medidas de control.

El denominador común del tipo de información a tratar es que se trata en su mayoría de información espacial o georeferenciada, tanto en el análisis de las propiedades de los suelos y los efectos de la erosión, como en el análisis de los procesos y del patrón de la erosión por cárcavas y barrancos. La adquisición de esta información y el procesamiento rápido y eficaz del gran volumen de datos necesarios, particularmente en estudios a escala regional, requiere del empleo de técnicas de la información espacial como son las bases de datos, la teledetección y los sistemas de información geográfica (SIG). Estas tecnologías son herramientas muy útiles, y su uso en el estudio, análisis y planificación del territorio interesa sea investigado para poder ampliar su aplicabilidad actual.

En este contexto, la presente investigación tiene una doble finalidad: a) el análisis del patrón de distribución espacial y de las propiedades de los suelos, conducentes al desarrollo de un sistema de información de suelos del Alt Penedès – Anoia, y b) el análisis de los procesos de erosión por cárcavas y barrancos, y de su patrón de distribución, conducentes a la modelización del riesgo de erosión. Ambos fines se abordan mediante el desarrollo de técnicas de bases de datos, teledetección y sistemas de información geográfica, como metodología de trabajo para priorizar actuaciones de conservación y de sostenibilidad de los usos del suelo.

1.2. El Alt Penedès – Anoia. Características del territorio y el problema de la erosión hídrica frente a la sostenibilidad

1.2.1. Localización del área de estudio

La presente investigación se ha llevado a cabo en un área de 30.000 hectáreas, localizadas en las comarcas de l'Alt Penedès y de l'Anoia, en la provincia de Barcelona (Figura 1.1).

Los límites naturales del área de estudio son:

- Oeste y noroeste: Sierra Prelitoral (Macizo del Gayà).
- Norte: divisoria de la riera de Masquefa.
- Este: río Llobregat.
- Sur y sudeste: divisoria de la cuenca del sistema Anoia – Riudeviltles y de la cuenca del río Foix, arroyo de l'Avernó y río Anoia (en la zona del escarpe de la falla Martorell – Gelida).

Desde el punto de vista geológico, el área de estudio se localiza en la Depresión del Vallès – Penedès, que es una de las fosas tectónicas más importantes de los Catalánides, originada

por dos fallas paralelas limitadas por la Sierra Litoral y la Sierra Prelitoral, y a la cual se le atribuye una edad oligocena a neógena superior (Arthaud *et al.* 1997 en Cabrera 1981). Esta depresión está rellena por materiales sedimentarios (lutitas, areniscas y conglomerados), en los cuales (en los más incoherentes) se ha formado una densa red de cárcavas y barrancos, de hasta varias decenas de metros de profundidad, que constituyen uno de los rasgos más característicos de la geomorfología de la zona.

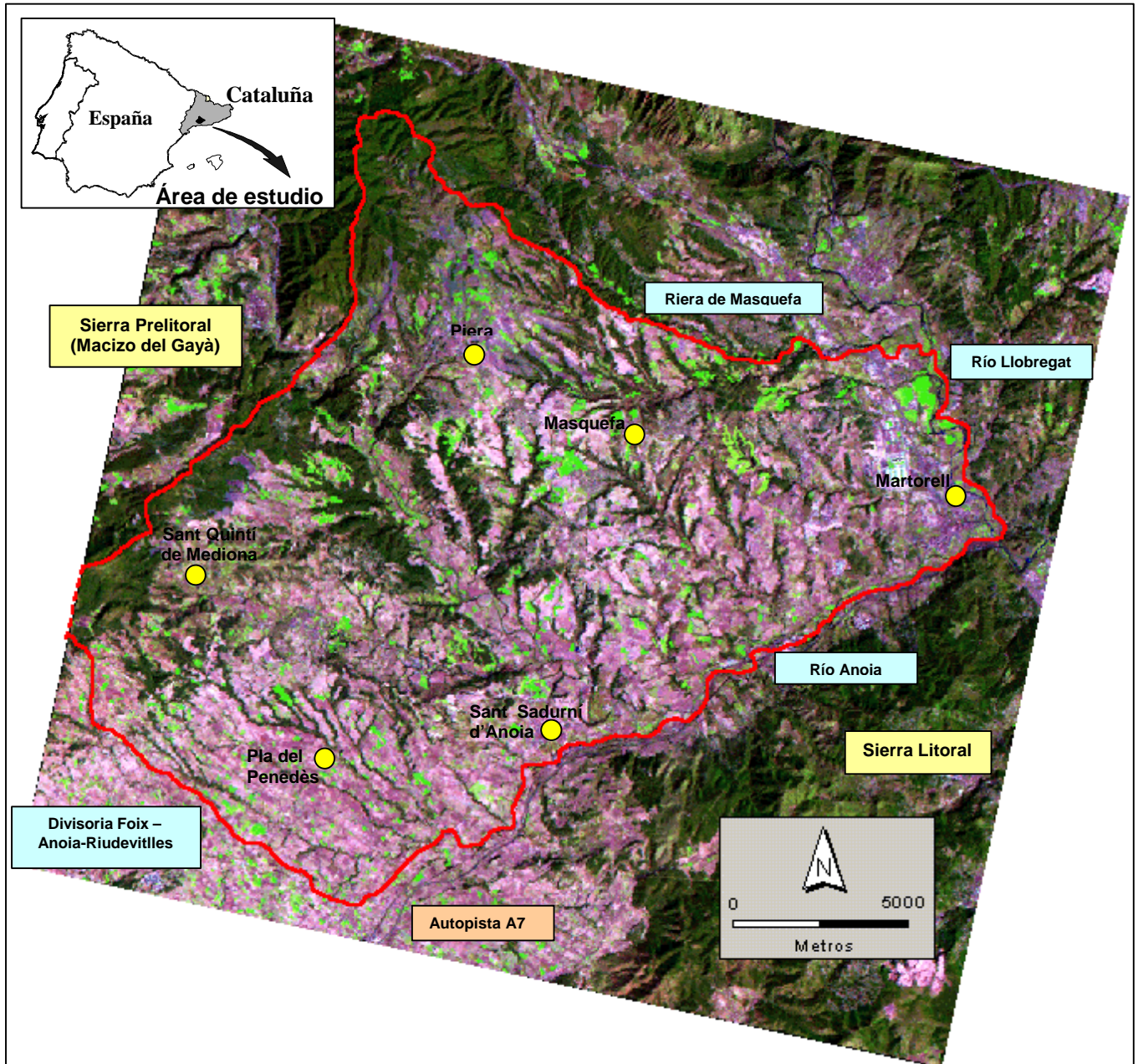


Figura 1.1. Localización del área de estudio. (Imagen Landsat TM de 28 de marzo de 1993, composición en falso color rojo-verde-azul 543).

1.2.2. Clima

Desde un punto climático, el área de estudio tiene un clima Mediterráneo, con una temperatura media anual de 21° C y una precipitación media anual entorno a los 660 mm, si bien existe una importante variabilidad interanual de las lluvias (Ramos y Porta 1994).

El máximo de precipitación se registra durante los meses de otoño, con tormentas de elevada intensidad. Intensidades de más de 100 mm h⁻¹ en periodos cortos son habituales en la zona (Ramos y Porta 1994, Usón 1998). Precipitaciones máximas en 24 horas de 90 a 125 mm se dan en la zona con periodos de retorno de entre 5 y 10 años (Ramos y Porta 1993).

La lluvia es el principal agente erosivo en el área de estudio. Varios estudios realizados en esta zona (Ramos *et al.* 1991, Ramos y Porta 1993, Ramos y Porta 1994, Usón 1998) han concluido que el valor anual del factor de erosividad de la lluvia (R), que varía entre 1049 y 1200 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹, no se distribuye homogéneamente a lo largo del año, sino que tiene un máximo absoluto en los meses de septiembre-octubre y otro máximo relativo en abril-mayo. Siendo estos los periodos en que la superficie del suelo necesita un tratamiento especial para evitar el impacto directo de las gotas de lluvia, que produce el sellado del suelo y escorrentía superficial (Usón 1998).

El régimen de humedad de los suelos es xérico y el régimen de temperatura es térmico.

1.2.3. Usos del territorio

El cultivo de la viña tiene una tradición muy antigua en el Penedès. Desde el siglo XVI se tiene constancia de contratos de naturaleza temporal para el cultivo de la viña (*Rabassa Morta*), que tenían por objeto la cesión de una tierra a un agricultor para que *la desbrozase y la plantase de viña, cultivándola según el uso y la buena costumbre* hasta el final de la vida productiva de la viña (Balcells 1980). El carácter temporal de estos contratos estaba basado en la ineludible extinción de la viña y en la alternancia viña-bosque, que era típica del área mediterránea.

Cuando, durante el siglo XVIII, aumentó la presión demográfica y la tierra resultó más escasa, los agricultores arrendatarios de las tierras mejoraron las técnicas de cultivo, extendiéndose la práctica de acodos y renuevos. De esta manera los agricultores consiguieron prolongar indefinidamente la vida productiva de las viñas, sin necesidad de volver a la alternancia viña-bosque ni tampoco de establecer nuevos contratos de arrendamiento. Paralelamente, y debido tanto al mencionado desarrollo de la población como del aumento de la exportación de vinos a Europa y América, el cultivo de la vid se incrementó notablemente, aumentándose de forma considerable la superficie dedicada a la viña al amparo de los contratos de *Rabassa Morta*. La superficie de la viña en Cataluña alcanzó su máxima extensión a finales del siglo XIX, con 385.000 ha, con un aumento de 100.000 ha entre 1873 y 1888 por la destrucción de viñas en Francia por la filoxera, que más tarde afectaría a la vid en Cataluña (Balcells 1980).

Desde entonces, la superficie de viña en Cataluña ha ido disminuyendo. Entre los años 1970 y 1994, con 118.379 ha y 66.481 ha respectivamente, la superficie disminuyó en un

44% (Tabla 1.1). En la provincia de Barcelona la reducción de la superficie durante este periodo no fue tan cuantiosa (25% de la superficie en 1970).

La reducción de la superficie de viña ha venido acompañada de una mayor tecnificación del cultivo y cualificación de la producción entorno a las normas de calidad de las denominaciones de origen. En concreto, en la Denominación de Origen Penedès, la superficie de viña acogida aumentó un 56% entre 1970 y 1994, acogiendo en la actualidad 26.495 ha.

Tabla 1.1. Superficie dedicada al cultivo de la viña. Periodo 1970-1994. (Fuente: Anuarios de Estadística Agraria, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación).

| Año | Superficie en Cataluña (ha) | Superficie en la provincia de Barcelona (ha) | Superficie en la D.O. Penedès (ha) |
|------|-----------------------------|--|------------------------------------|
| 1970 | 118.379 | 34.870 | 17.000 |
| 1975 | 110.812 | 30.650 | 22.796 |
| 1980 | 102.206 | 27.890 | 24.618 |
| 1985 | 93.704 | 27.965 | 24.618 |
| 1990 | 85.143 | 26.331 | 25.749 |
| 1994 | 66.481 | 26.198 | 26.495 |

En el área en que se centra la investigación, y según mediciones realizadas en base a la clasificación de una imagen del satélite Landsat de marzo de 1993 (capítulo 5 – sección 5.2 de la presente tesis), la superficie cultivada de viña era en esta fecha de 9.320 ha, siendo el cultivo por excelencia en la zona. El siguiente cultivo mayoritario eran los cereales de invierno (1.350 ha), que constituyen la actual alternancia a la viña. Las zonas forestales, bosques mixtos de *Pinus halepensis* y *Quercus ilex*, y matorrales boscosos, suponían 14.900 ha, siendo la mayor ocupación del área, donde se incluyen las zonas de montaña y las paredes de barranco vegetadas. El resto del área está ocupada por áreas urbanas e industriales, vías de comunicación y otros usos agrícolas de menor importancia.

1.2.4. Erosión y necesidad de información territorial para una agricultura sostenible

La tecnificación de la producción vitícola mencionada, no ha conllevado una preocupación por la conservación del recurso suelo, consecuente con una sostenibilidad de los usos actuales. La tecnificación ha significado el rediseño de la mayoría de las plantaciones de viña y la desaparición de muchas de las medidas tradicionales de conservación de suelos (Figura 1.2). Esto ha reactivado los procesos erosivos, incrementándose las pérdidas de suelos tanto por erosión laminar y por arroyaderos, como de suelos y superficie cultivable por el crecimiento de cárcavas y retroceso de las paredes de barrancos.

En este sentido, López (1994) estimó pérdidas de suelo, debidas a procesos de erosión laminar y por arroyaderos, superiores a $12 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (mayores a las tolerables según el USDA-SCS) en el 63% de la superficie de un área modelo de 490 ha, y Porta y Ramos (1995) calcularon pérdidas medias en plantaciones tradicionales de viña de $11 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, con pérdidas de hasta $100 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en plantaciones modernas.

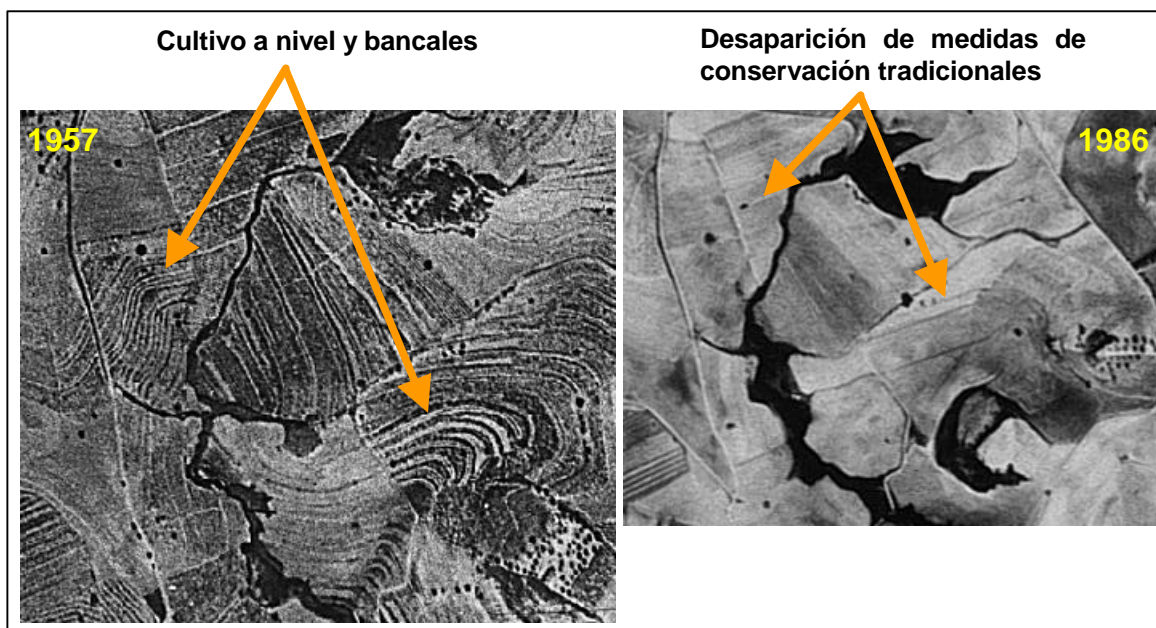


Figura 1.2. Ejemplo de los cambios producidos en las últimas décadas en los sistemas de cultivo de la viña. Izquierda: fotografía aérea de 1957 (escala original aproximada 1:30.000, en la zona de Sant Llorenç d’Hortons) que muestra la práctica de cultivos a nivel y bancales en las plantaciones de viña. Derecha: fotografía aérea de 1986 (escala original aproximada 1:30.000, en la misma zona), muestra la desaparición de los cultivos a nivel y bancales, y el crecimiento de la cárcava ocurrido en este periodo.

La medida de conservación de suelos más utilizada, es un tipo de terraza paralela a las hileras de la plantación que se denomina localmente *rasa*. El diseño de estas terrazas es empírico y, aunque en muchos casos cumplen su función de evacuar el agua de escorrentía, pueden influir en el crecimiento de cárcavas en las parcelas de viña (Porta *et al.* 1994, Ramos y Porta 1997, Meyer y Martínez-Casasnovas 1998) (Figura 1.3).

En otros casos de construcción de terrazas y desagües, como el diseño por parte de los agricultores se hace sin los suficientes criterios técnicos, la distancia entre terrazas es excesiva y se produce la concentración de flujo de forma incontrolada antes de llegar a estos canales. En muchos de estos casos, los agricultores utilizan los restos de poda para frenar el crecimiento de las cárcavas en estas vías preferenciales de flujo, aunque no resulta una medida muy efectiva.

Los daños producidos por la incisión de cárcavas y barrancos son los más patentes a los ojos de los agricultores. Una de las consecuencias más graves es la disección de las parcelas, que conlleva la dificultad para el tránsito de la maquinaria y la pérdida de superficie agrícola útil (Figura 1.4). Aproximadamente el 20% de la superficie, en un área de la zona de Masquefa, ha sido afectada por la erosión por cárcavas y barrancos (Boixadera 1983, Porta *et al.* 1994), llegando a causar grandes incisiones en el paisaje. Sin embargo, no se dispone de información de cual es la tasa de crecimiento de cárcavas y/o barrancos ni cual es el patrón de crecimiento, información que sería de utilidad en la planificación de medidas de control.



Figura 1.3. Izquierda: concentración de flujo en un canal de desagüe en el borde de una parcela de viña durante una tormenta. Derecha: cárcava desarrollada en el borde de la parcela, donde se concentra el flujo del agua. Esta cárcava va siendo periódicamente rellenada con tierra por el agricultor, ya que afecta a uno de los caminos de paso de la maquinaria en la parcela.



Figura 1.4. Secuencia de la disección de parcelas y del territorio causada por la erosión por cárcavas y barrancos. Izquierda: dificultad para el tránsito de la maquinaria por la incisión de una cárcava en una parcela de viña (foto: A. Meyer). Centro: cárcava desarrollada en una parcela transformada antes de la plantación de la viña. Derecha: barranco, que supone una gran disección en el paisaje y la pérdida de superficie de cultivo a largo plazo.

El rediseño de las plantaciones de viña ha conllevado, en muchos casos, la transformación de las parcelas, realizando grandes movimientos de tierra y rellenando barrancos para conseguir nuevas parcelas de mayores dimensiones y menores pendientes (Figura 1.5). Estas medidas no suelen ser suficientes para evitar la erosión por cárcavas y barrancos

(Meyer y Martínez-Casasnovas 1998), ya que los materiales incoherentes del relleno o bien cedan tras las primeras lluvias o bien se asientan produciendo un canal preferente de concentración del flujo superficial.

Los movimientos de tierra que conllevan las nuevas parcelas se están haciendo, generalmente, sin tener en cuenta ningún tipo de información básica de suelos, y sin considerar como pueden ser las características de los suelos resultantes después de las nivelaciones, al dejar en superficie materiales antes más profundos (Boixadera y Porta 1995, Poch *et al.* 1996).



Figura 1.5. Diseño de parcelas para nuevas plantaciones de viña. Izquierda: movimientos de tierra. Derecha superior: parcela tras los movimientos de tierra y nivelación. Derecha inferior: colapso de la zona de barranco rellenada en una nueva plantación de viña tras las primeras lluvias (foto: A. Meyer).

La necesaria información de suelos, para ser útil en planificación a nivel de parcela habrá de estar a una escala muy detallada, mientras que para ser usada en planificación a nivel regional bastará con escalas semidetalladas. En cualquier caso, la información de suelos a escala semidetallada servirá para conocer los principales tipos de suelos existentes en toda el área de estudio, sus propiedades y comportamiento frente a la actuación tanto de los procesos erosivos como a las actuaciones antrópicas conducentes al diseño de nuevas parcelas para plantaciones de viña.

Por lo que respecta a los problemas de erosión por cárcavas y barrancos, generalizados en toda el área de estudio, se ha constatado la necesidad de establecer medidas de control efectivas que, por una parte, respondan a un plan de actuación a nivel de todo el área de estudio, reconociendo las áreas prioritarias, y de cuya necesidad e implementación sean aceptables para los agricultores. El establecimiento de estos planes de actuación debe

basarse en información, de la cual generalmente no se dispone en la actualidad, sobre las áreas erosionadas, su grado de actividad erosiva actual, y la identificación de los factores que determinan el crecimiento de nuevas cárcavas y el desarrollo de las cárcavas y barrancos ya existentes. El conocimiento de estos factores, aparte de predecir la erosión futura, también llevará a determinar las posibilidades de control de la erosión por cárcavas y barrancos.

1.3. Tecnologías de la información espacial como metodología en el análisis del territorio

Las tecnologías de la información espacial, como las bases de datos, la teledetección y los sistemas de información geográfica (SIG), necesitan de estructuras de datos y de metodologías para la obtención de información aplicable al análisis y planificación del territorio.

Tradicionalmente, la información de suelos se ha venido plasmando en mapas de suelos, mientras que en la actualidad se hace en los denominados sistemas de información de suelos (SIS) (Boixadera y Porta 1991, Burrough 1991 y 1993, Fernández y Rusinkiewicz 1993). Estos sistemas necesitan de estructuras de datos que organicen lógicamente la información que se adquiere durante la prospección de suelos. La base de datos así podrá ser después utilizada para el análisis de las propiedades de los suelos y en otras aplicaciones, como por ejemplo en evaluación de suelos.

Normalmente, las bases de datos de suelos existentes suelen reflejar la estructura del mapa de suelos a partir de los cuales han sido creadas (Frigolé 1997). Una de las estructuras de mapa de suelos más utilizadas en el diseño de bases de datos ha sido la basada en las relaciones suelo-paisaje (Valenzuela 1988, Zinck y Valenzuela 1990, Fernández y Rusinkiewicz 1993). Esta estructura permite el diseño de bases de datos espaciales de suelos a diferentes niveles de detalle, utilizando como vínculo de unión de los diferentes niveles la jerarquía de las formas de relieve o geofomas.

Por lo que respecta al campo de la erosión hídrica, las técnicas de SIG y teledetección han sido ampliamente utilizadas tanto en la cartografía de los fenómenos erosivos como en la modelización de la erosión (predicción y estimación de pérdidas de suelo). No obstante, la mayor parte de los trabajos de investigación y estudios a este respecto han estado dirigidos a la aplicación de modelos existentes como la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE) (Wischmeier y Smith 1978) u otras ecuaciones derivadas de ella, como RUSLE o SLEMSA (Logan *et al.* 1982, Pelletier 1985, Griffiths y Richards 1989, Blaszczyński y Fulton 1992, Anys *et al.* 1994).

Estos modelos solamente predicen las pérdidas de suelo por erosión laminar y por arroyaderos. Además, su aplicación mediante SIG ha sido generalmente inapropiada (Moore y Wilson 1992, Mitasova *et al.* 1996). El factor más problemático de estimar y también de aplicar a vertientes complejas es el factor LS (Moore y Wilson 1992), aunque esto ha sido solucionado por estos autores mediante un método para estimar el factor LS a partir de modelos digitales de elevaciones y operaciones SIG.

También, los SIG han sido utilizados como herramienta en la modelización del flujo superficial y de las pérdidas de suelo en áreas de drenaje, aplicando modelos más complejos de base física como ANWERS (De Roo 1993) y AGPNS (Young y Onstad 1987, Olivieri *et al.* 1996). Otros autores han modelado los efectos hidrológicos en cuencas de drenaje producidos por cambios de usos del suelo, usando técnicas de SIG y teledetección para la estimación de los parámetros en los que se basan los modelos (Newmann y Schultz 1989, Schultz 1994).

Por otra parte, son numerosos los ejemplos de aplicaciones de los SIG y la teledetección en la adquisición y procesamiento de datos en modelos de erosión basados en la combinación de factores de los cuales se supone, por conocimiento deductivo, una relación con la existencia o potencial para la erosión (Millington 1986, Garg y Harrison 1992).

Sin embargo, pocos estudios han sido dedicados al uso de estas tecnologías de la información espacial en la investigación sobre los procesos y factores relacionados con la erosión por cárcavas y barrancos. Estos trabajos han estado dirigidos no tanto al conocimiento de los procesos como a la determinación de los factores del territorio relacionados con la existencia de erosión.

Uno de los ejemplos más significativos es el trabajo de Bocco (1990), quien dedujo una serie de reglas, basadas en el análisis espacial mediante SIG de factores relacionados con la existencia de erosión por barrancos, para la predicción de este tipo de erosión. Más recientemente, otros autores también han venido trabajando en esta dirección (Vazquez y Zinck 1994).

Actualmente, la investigación en el ámbito de la erosión por cárcavas y barrancos está ligada al uso de los SIG y la teledetección como herramientas para la adquisición, el análisis y la modelización de la información espacial relativa al territorio.

Por una parte, el desarrollo de operaciones topológicas en estructuras de datos en mallas regulares (*raster*) ha hecho posible la extracción automatizada de atributos topográficos primarios a partir de modelos digitales de elevaciones (Moore *et al.* 1991, Moore *et al.* 1993): orientación, grado de la pendiente, cuenca de drenaje, área de drenaje específica (área de drenaje que drena a través de una unidad de longitud de curva de nivel), longitud del camino que recorre el flujo del agua, curvatura en planta, curvatura en perfil, flujo acumulado, red de drenaje, etc. Estos atributos han sido utilizados, normalmente a través de índices compuestos, para describir la distribución espacial de zonas con acumulación de flujo, contenido de humedad del suelo, erosión laminar, etc., habiéndose utilizado algunos de ellos en la predicción de áreas con potencial topográfico para la erosión por cárcavas (Moore *et al.* 1988).

La otra tendencia actual en la investigación sobre cárcavas y barrancos es la del estudio evolutivo en base a imágenes de satélite, fotografías aéreas o imágenes vídeo multitemporales (Strömquist *et al.* 1985 en Brooks *et al.* 1991, Palacio y López 1994, Martínez-Casasnovas *et al.* 1997). Estos estudios son la base de un nuevo enfoque en la modelización de cárcavas y barrancos, enfoque evolutivo, que ha sido recientemente formulado por Zinck (1997), y que ha de estar encaminado a determinar el patrón de crecimiento y expansión de estos fenómenos erosivos.

El enfoque multitemporal de análisis de fotografías aéreas por medios fotogramétricos también ha sido utilizado para cuantificar tasas de erosión por cárcavas (Thomas *et al.* 1986, Dymond y Hicks 1986), siendo estos estudios los precursores de una metodología que actualmente ha de experimentarse usando modelos digitales de elevaciones y sistemas de información geográfica. Esta metodología, además de ofrecer información sobre la tasa de erosión, servirá para localizar espacialmente las áreas de mayor profundización de las cárcavas y barrancos, y también las áreas donde se producen movimientos en masa.

1.4. Objetivos generales de la investigación

Los objetivos generales que se plantean en la presente investigación son:

- 1) Desarrollo de un sistema de información de suelos a escala semidetallada del área de estudio, basado en el análisis y estructura de las relaciones suelo-paisaje. Este sistema de información ha de servir para caracterizar la distribución espacial y propiedades de los suelos a nivel regional, y para el análisis de las propiedades de los suelos en relación a los procesos de erosión hídrica, en particular erosión laminar y por arroyaderos.
- 2) Análisis de los procesos de erosión por cárcavas y barrancos a escala detallada y semidetallada, conducentes al conocimiento de las áreas afectadas, grado de actividad erosiva actual (incluyendo tasas de erosión), factores del territorio relacionados con la existencia de erosión, predicción de la existencia de cárcavas a nivel de parcela y del retroceso de las paredes de las cárcavas y barrancos existentes.
- 3) Desarrollo de metodologías, basadas en el uso de tecnologías de la información espacial (bases de datos, sistemas de información geográfica y teledetección), para la adquisición, almacenamiento y análisis de datos relativo a los objetivos planteados relacionados con el desarrollo de sistemas de información de suelos y de análisis y modelización de fenómenos de erosión por cárcavas y barrancos.

1.5. Estructura de la memoria

La presente investigación se estructura en capítulos que hacen referencia a los distintos objetivos planteados (Figura 1.6).

En el capítulo 2 se presenta una síntesis de la geología del Alt Penedès – Anoia y el análisis de las geoformas. Este análisis es la base sobre la que se desarrolla y se estructura el sistema de información de suelos (capítulo 3), diseñado según un modelo de datos georelacional, a partir del cual se analizan las propiedades de los suelos en relación a la erosión hídrica.

El capítulo 4 recoge la investigación sobre la erosión por cárcavas y barrancos, relativa a la caracterización de los procesos que ocurren en el área de estudio, el grado de erosividad actual y tasas de erosión, el análisis del patrón de crecimiento y desarrollo de cárcavas y barrancos, y la predicción de la erosión futura. Esta investigación está basada en la

utilización de metodologías de SIG y teledetección que se incluyen parte en este capítulo 4 y parte en secciones del capítulo 5.

El capítulo 5 recoge, en diferentes secciones, distintas metodologías basadas en tecnologías de la información (bases de datos, sistemas de información geográfica y teledetección), que han servido para el desarrollo de los dos primeros objetivos generales de la presente investigación.

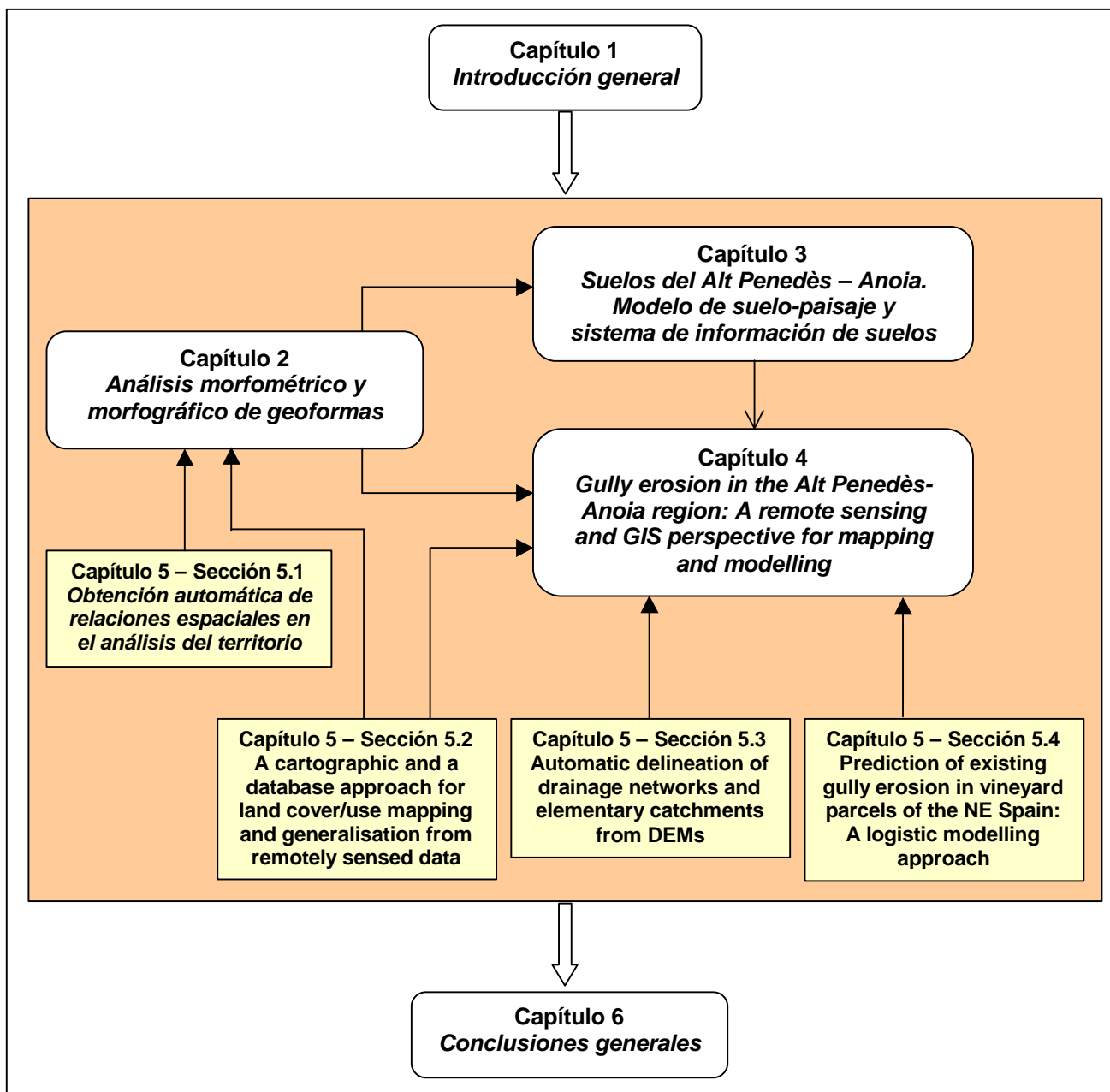


Figura 1.6. Estructura de la presente tesis.

Las secciones de este capítulo constituyen diferentes publicaciones:

- Obtención automática de relaciones espaciales en el análisis del territorio: Relaciones de adyacencia (vecindad) entre geoformas en el Alt Penedès – Anoia (Cataluña). *J.A. Martínez-Casasnovas, 1er Congreso Nacional de Información Geográfica, Valladolid, Octubre 1998.*
- A cartographic and database approach for land cover/use mapping and generalisation from remotely sensed data. *J.A. Martínez-Casasnovas. International Journal of Remote Sensing, (enviado en febrero 1998, revisado en agosto 1998).*
- Automatic delineation of drainage networks and elementary catchments from DEMs. *J.A. Martínez-Casasnovas and J.H. Stuiiver, ITC Journal, (en prensa).*
- Prediction of existing gully erosion in vineyard parcels of the NE Spain: A logistic modelling approach. *A. Meyer and J.A. Martínez-Casasnovas. Soil Research and Tillage (enviado en agosto 1998).*

Cada uno de estos capítulos presenta la estructura clásica de los trabajos de investigación: introducción, materiales y métodos o metodología, resultados y discusión, y conclusiones.

Finalmente, el capítulo 6 presenta las conclusiones generales de la presente investigación.

1.6. Referencias bibliográficas

Anys, H., Bonn, F. y Merzouk, A., 1994,. Remote Sensing based mapping and modelling of water erosion and sediment yield in a semi-arid watershed of Morocco. *Geocarto International*, 1: 31-40.

Balcells, A., 1980, *El problema agrario en Cataluna. La cuesti3n rabassaire (1890-1936)*. Serie de Estudios. Ministerio de Agricultura.

Blaszczynski, J. y Fulton, J.L., 1992, Regional soil loss prediction using the RUSLE/GIS interface. In: *Geographic Information Systems and mapping practices and standars*, Johnson, A. and C.B. Pettersson (editors), ASTM, Philadelphia, pp. 122-131

Bocco, G., 1990, *Gully erosion analysis using remote sensing and Geographical Information Systems. A case study in central Mexico*. PhD thesis. University of Amsterdam- ITC, Amsterdam- Enschede.

Boixadera, J., 1983, *Proyecto de un área modelo de conservaci3n de suelos en Piera-Masquefa*. PFC, ETSEA, UPC, Lleida.

Boixadera, J. y Porta, J., 1991, *Informaci3n de suelos y evaluaci3n catastral. Método del valor ndice*. Centro de gesti3n Catastral y Cooperaci3n Tributaria, Ministerio de Economía y Hacienda, Madrid.

Boixadera, J. y Porta, J., 1995, Informaci3n de s3ls i sostenibilitat de la vinya al Penedès: Plans de conservaci3n de s3ls i aigües. En: *Jornades de Transferència de Tecnologia sobre Conservaci3n de S3ls i Aigües en Vinyes*, J.A. Martínez-Casasnovas (editor), DMACS-UdL i INCAVI-DARP, Vilafranca del Penedès-Lleida, pp. 70-79.

Burrough, P.A., 1991, Soil information systems. In: *Geographical Information Systems, Volume 2: Application*, D.J. Maguire, M.F. Goodchild y D.W. Rhind (editors). Longman Scientific & Technical, New York, reprint 1994, pp. 153-169.

Burrough, P.A., 1993, The technology paradox in soil survey: methods and techniques of data capture and handling. *ITC Journal* 1993-1: 15-22.

Brooks, N.K., Folliot, P.F., Gregersen, H.M. y Thomas, J.L., 1991, *Hydrology and the management of watersheds*. Iowa State University Press.

Cabrera, L., 1981, Influencia de la tect3nica en la sedimentaci3n continental de la cuenca del Vallès – Penedès (provincia de Barcelona, Espana), durante el Mioceno inferior. *Acta Geol3gica Hispánica*, 16(3): 165-171.

De Roo, A.P.J., 1993, Modelling surface runoff and soil erosion in catchments using Geographical Information Systems. *Nederlandse Geografische Studies* 157. Universiteit Utrecht.

Dymond, R.J. y Hicks, D.L., 1986, Steepland erosion measured from historical aerial photograp. *Journal of Soil and Water Conservation*, 41: 252-255.

Fernández, R.N. y Rusinkiewicz, M., 1993, A conceptual design of a soil database for a geographical information system. *International Journal of Geographic Information Science*, 7: 525-539.

- Gallart, F.**, 1981, Neógeno superior y Cuaternario del Penedès (Catalunya, España). *Acta Geológica Hispánica*, 16: 151-157.
- Garg, P.K. y Harrison, A.R.**, 1992, Land degradation and erosion risk analysis in S.E. Spain: A GIS approach. *Catena*, 19: 411-425.
- Griffiths, J.S. y Richards, K.S.**, 1989, Application of a low-cost database to soil erosion and soil conservation studies in the Awash Basin, Ethiopia. *Land Degradation and Rehabilitation*, 1: 241-262.
- Logan, T.J., Urban, D.R., Adams, J.R. y Yaksich, S.M.**, 1982, Erosion control potential with conservation tillage in the Lake Erie Basin: Estimates using the Universal Soil Loss Equation and the Land Resource Information System (LRIS). *Journal of Soil and Water Conservation*, 37: 50-55.
- López, C.**, 1994, *Establecimiento de un plan de conservación de suelos en un área modelo de 490 ha en el Alt Penedès*. PFC. ETSEA-UdL. Lleida.
- Martínez-Casasnovas, J.A., Poch R.M., Fargas D., Serrat N., Penella E. y Andreu N.**, 1997, Estado de conservación de los suelos de la cuenca del embalse Joaquín Costa. *Actas del Encuentro Científico-Técnico sobre el vaciado total y prolongado del embalse de Joaquín Costa*, Confederación Hidrográfica del Ebro, Zaragoza, 22-24 de octubre 1997, pp. 1-12.
- Meyer, A. y Martínez-Casasnovas, J.A.**, 1998, Prediction of existing gully erosion in vineyard parcels of the NE Spain: A logistic modelling approach. *Soil Technology* (submitted).
- Millington, A.C.**, 1986, Reconnaissance scale soil erosion mapping using a simple GIS in the humid tropics. In: *Land evaluation for land-use planning and conservation in sloping areas*, W. Siderious (editor), ILRI publication num. 40. Wageningen, pp. 64-81.
- Mitasova, H., Jaroslán, M.Z. y Iverson, L.R.**, 1996, Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *International Journal of Geographic Information Sciences*, 10: 629-641.
- Moore, I.D., Burch, G.J. y Mackenzie, D.H.**, 1988, Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of ephemeral gullies. *Transactions of the ASAE*, 31: 1098-1107.
- Moore, I.D., R.B. Grayson y A.R. Landson.** 1991. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications. *Hydrological Processes*. 5: 3-30.
- Moore, I.D. y Wilson, J.P.**, 1992, Length-Slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 47, pp 423-428.
- Moore, I.D., Turner, A.K., Wilson, J.P., Jenson, S.K. y Band, L.E.**, 1993, GIS and land surface-subsurface process modelling. In: *Environmental modelling with GIS*. M.F. Goodchild, B.O. Parks and L.T. Steyaert (editors), Oxford University Press, New York, pp. 196-230.
- Neumann, P. y Schultz, G.A.**, 1989, Hydrological effects of catchment characteristics and land use changes determined by satellite imagery and GIS. *IAHS Publication*, 186, pp 186-176.
- Olivieri, L.J., Motsch, B., Schaal, G.M. y Elliot, W.J.**, 1996, *Linking remote sensing and GIS to soil conservation: Generating AGNPS input using remote sensing and GIS*. Internet document. www.dnr.ohio.gov/odnr/reim/remsen/agnps/

- Palacio, J.L. y López, J.**, 1994, Videography: an alternative remote sensing tool for monitoring gully erosion. *ITC Journal* 1994-3: 233-237.
- Pelletier, R.E.**, 1985, Evaluating non point pollution using remotely sensed data in soil erosion models. *Journal of Soil and Water Conservation*, 40: 332-335.
- Poch, R.M., Martínez-Casasnovas, J.A., Usón, A. y Ramos, M.C.**, 1996, Conservació de sòls en vinyes de l'Anoia-Penedès: Un enfoc cap a la sostenibilitat. *Jornades Agràries de la Fira de Sant Josep*. Col. Ofic. Eng. Tèc. Agr. de Catalunya i Patronat Fires de Mollerusa. Mollerusa. 13 pp.
- Porta, J., Ramos, M.C. y Boixadera, J.**, 1994, Mechanical measures for runoff management and erosion control in the vineyards of North East Spain. In: *Conserving soil resources: European perspective*, R.J. Rickson (editor), CAB International, Wallingford, pp. 369-378.
- Porta, J. y Ramos, M.C.**, 1995, Pèrdues de Sòl i de nutrients per erosió en camps de vinya: quantificació. En: *Jornades de Transferència de Tecnologia sobre Conservació de Sòls i Aigües en Vinyes*, J.A. Martínez-Casasnovas (editor), DMACS-UdL i INCAVI-DARP, Vilafranca del Penedès-Lleida, pp 56-62.
- Ramos, M.C., Porta, J. y Boixadera, J.**, 1991, Rainfall characteristics and soil losses in vineyards in the NE Spain. *ESSC Seminar on Combating soil erosion in vineyards*. Trier, Alemanya.
- Ramos, M.C. y Porta, J.**, 1993, Modelos de distribución espacio-temporal de las lluvias en la zona mediterránea del Anoia-Penedès. Influencia en la sostenibilidad de los cultivos de la zona. *Ecología*, 7: 45-56.
- Ramos, M.C. y Porta, J.**, 1994, Rainfall intensity and erosive potential in NE Spain Mediterranean area. First results on sustainability of vineyards. *Il Nuovo Cimento*, 17: 291-299.
- Ramos, M.C. y Porta, J.**, 1997, Analysis of design criteria for vineyard terraces in the mediterranean area of North East Spain. *Soil Technology*, 10: 155-166.
- Schultz, G.A.**, 1994, Meso-scale modelling of runoff and water balances using remote sensing and other GIS data. *Hydrological Sciences Journal*, 39: 121-142.
- Thomas, A.W., Welch, R. y Jordan, T.R.**, 1986, Quantifying concentrated-flow erosion on cropland with aerial photogrammetry. *Journal of Soil and Water Conservation*, 41: 249-252.
- Usón, A.**, 1998, *Medidas de control de la erosión en suelos de viña de las comarcas Anoia – Alt Penedès (Barcelona): Efectividad y viabilidad*. Tesis doctoral. Universitat de Lleida, Lleida.
- Vazquez, L. y Zinck, J.A.**, 1994, Modelling gully distribution on volcanic terrains in the Huasca ara, central Mexico. *ITC Journal* 1994-3: 238-251.
- Wischmeier, W.H. y Smith, D.D.**, 1978, *Predicting rainfall erosion losses - A guide to conservation planning*. USDA Agriculture Handbook num. 537. US Government Printing Office. Washington, DC.
- Young, R.A. y Onstad, C.A.**, 1987, *AGNPS, Agricultural Non-Point-Source Pollution Model. A watershed analysis tool*. USDA. Report 35. USDA, Washington, D.C., US.

Zinck, J.A., 1997, Riesgos ambientales y suelos. Enfoques para la modelización de la erosión por cárcavas y movimientos en masa. *Edafología*, special edition of the 50th anniversary of the Spanish Soil Science Society, pp 283-297.

2. Análisis morfométrico y morfográfico de geoformas en el Alt Penedès – Anoia

2.1. Introducción

2.1.1. Objetivo

La Geomorfología es considerada como uno de los principales factores formadores de los suelos y uno de los factores que influyen o determinan el riesgo de erosión hídrica.

La relación existente entre unidades geomorfológicas y unidades de suelos se debe a su origen y evolución comunes, lo que permite establecer unidades morfoedáficas (Gaucher 1981). Numerosos autores han reconocido y/o utilizado las formas del terreno (geoformas) como clave para identificar los límites de cuerpos naturales de suelos, para explicar su génesis y para estructurar la información de suelos, tanto en las leyendas de los mapas de suelos como más recientemente en bases de datos espaciales de suelos (Gerrard 1981, Wambeke y Forbes 1985, Meijerink 1988, Valenzuela 1988, Agbu *et al.* 1989, Kreznor *et al.* 1989, Walker 1989, Roca *et al.* 1990, Swanson 1990, Zinck y Valenzuela 1990, Martínez-Casasnovas 1992, Nizeyumana y Bick 1992, Stalt *et al.* 1993a, Stalt *et al.* 1993b).

Por otra parte, la relación existente entre las características morfométricas y morfográficas del terreno con los procesos superficiales de movimiento del agua y procesos de erosión-deposición de los suelos ha hecho que la cartografía geomorfológica y/o la de los principales atributos morfométricos del terreno hayan sido utilizadas como herramientas en la identificación y delimitación de áreas con existencia o con riesgo de erosión hídrica (Schumm y Hadley 1961, Williams and Morgan 1976, Kreznor *et al.* 1989, van Ghelue y van Molle 1990, Hernández 1991). En este sentido, la tecnología de los sistemas de información geográfica (SIG) ha abierto, a partir de los años 80 y 90, nuevas posibilidades, no sólo para el análisis morfométrico de las geoformas (Meijerink 1988, Dikau 1989, Moore *et al.* 1991), sino también para la modelización de los efectos topográficos en la localización de áreas con riesgos de erosión laminar y por cárcavas (Moore *et al.* 1988, Mitsova *et al.* 1996).

En este contexto, el objetivo de la presente investigación es la cartografía y el análisis morfométrico y morfográfico de las geoformas del Alt Penedès – Anoia, como base para el estudio de las relaciones con los procesos superficiales relativos a la formación y evolución de los suelos y de la erosión hídrica. Este estudio se ha realizado a escala 1:50.000, correspondiente a un nivel semidetallado. Se ha desarrollado un proceso metodológico basado en el uso de fotografías aéreas, modelos digitales de elevaciones y SIG para llevar a cabo la delineación de las geoformas y su análisis morfométrico y morfográfico.

Como antecedente a dicho análisis, se recoge en primer lugar una revisión bibliográfica referente a la geología de la zona. Esta revisión se basa en los trabajos del IGME (1973, 1975a, 1975b, 1975c), Gallart (1980 y 1981) y Cabrera (1981). Este estudio ha permitido conocer la naturaleza de los materiales litológicos que conforman el área de estudio como condicionantes de las formas del terreno, suelos actuales y la dinámica y evolución del área.

2.1.2. Síntesis de la geología del Alt Penedès – Anoia

Dos grandes unidades geográficas constituyen la totalidad del marco abarcado por el área de estudio: la Sierra Prelitoral (Macizo del Gayà) y la Depresión del Vallès-Penedès (dominio de l'Alt Penedès).

La Depresión del Vallès-Penedès es una de las fosas tectónicas más importantes de los Catalánides, atribuyéndosele una edad aproximada de entre 25 a 2 millones de años, Oligocena a Neógena superior (Arthaud *et al.* 1977 en Cabrera 1981). Las fracturas más importantes que limitan la depresión tienen una orientación SW - NE (límites con la Sierra Prelitoral y con la Sierra Litoral). Otras fracturas atraviesan también la fosa de NW a SE (fallas de Capellades-Vallcarca y del Llobregat), habiendo definido en ella tres dominios sedimentarios diferentes: Vallès, Alt Penedès y Baix Penedès (Figura 2.1).

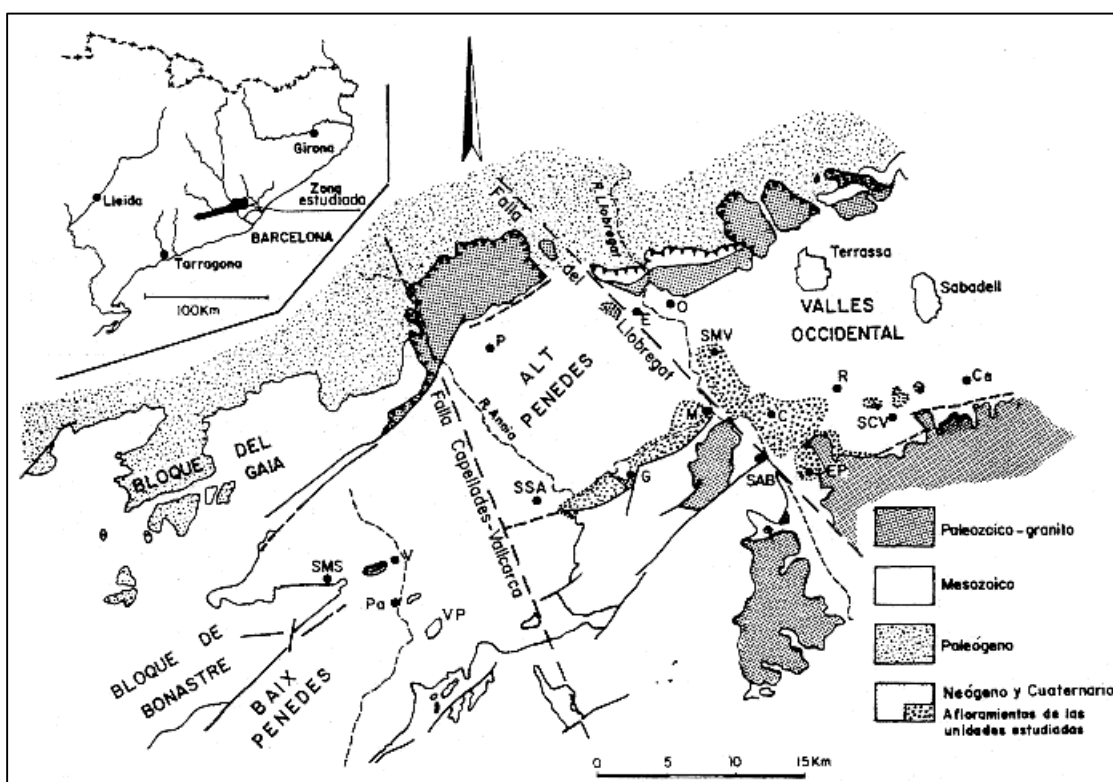


Figura 2.1. Esquema geológico y disposición de las fallas de la Depresión del Vallès – Penedès, (fuente: Cabrera 1981). Localidades: C, Castellbisball; Ce, Cerdanyola; E, Esparraguera; EP, El Papiol; G, Gelida; M, Martorell, O, Olesa; P, Piera; Pa, Pacs; R, Rubí; SAP, Sant Andreu de la Barca; SCV, Sant Cugat del Vallès; SMS, Sant Martí Sarroca; SMV, Sta. M^a de Vilalba; SSA Sant Sadurní d’Anoia; V, Vilobí; VP, Vilafranca del Penedès.

Los hundimientos diferenciales de estas fallas han condicionado la sedimentación detrítica continental en la depresión, influyendo en la distribución y dinámica de las macrounidades estructurales y produciendo diferentes patrones de denudación.

Los materiales más antiguos de la fosa se hallan relacionados a la falla que limita la depresión por el SE (Sierra Litoral). Posteriormente la atenuación o detención de las fallas de este

margen, y el progresivo levantamiento relativo del bloque del Gayà, simultáneo al hundimiento de la fosa, dio lugar a una depresión asimétrica. Esto significó cambios radicales del dispositivo sedimentario: la sedimentación de las litofacies propias de zonas proximales queda restringida al margen septentrional de la fosa, mientras que en sus zonas centrales y meridionales se establecen los ambientes deposicionales propios de zonas medias o distales. Este hecho lo revela la disposición basculada del relleno sedimentario hacia el NW, el relieve más enérgico del labio levantado, y el sentido del aporte del mismo relleno en dirección NW-SE (Gallart 1981).

La sedimentación se desarrolló fundamentalmente en sistemas de abanicos aluviales, con zonas proximales a la Sierra Prelitoral donde es detrítico gruesa, y áreas distales donde la sedimentación de finos se alternaba con la de carbonatos lacustres. Los materiales que rellenan la fosa se relacionan con las áreas fuente de la Sierra Prelitoral: a) El zócalo paleozoico, que aflora en la zona al norte de Sant Quintí de Mediona, constituido por materiales pizarrosos afectados de metamorfismo regional, y b) materiales mesozoicos que afloran en la zona centro y sur, principalmente arcillas, calcilutitas y calizas dolomíticas del Keuper, dolomías jurásicas y calizas cretácicas.

Durante el Burdigaliense Superior se produjo una transgresión marina (Magné 1979 en Cabrera 1981), extendiéndose sobre las zonas medias y distales de los abanicos aluviales y areniscas y calcilutitas de las zonas más distales (valle del Anoia). Los materiales depositados durante esta época en la fosa y hasta el Mioceno Superior son:

- a) Arcillas con bancos calcáreos detríticos e intercalaciones detríticas, que comprenden la mayoría de los materiales marinos con algunas intercalaciones continentales.
- b) Limos y arcillas de color amarillo y rosado con paleocanales de gravas (lentejones) de gravas sin cementar, que comprenden la mayor parte de los materiales continentales (Astaracienses y Vallesianos), encontrándose también algunos paleosuelos. (Esto podría indicar la existencia de relieves dentro de la depresión, habiendo cubetas locales).

La finalización del Mioceno (hace unos 5 millones de años) coincide con una regresión marina general, favoreciéndose las deposiciones fluvio-torrenciales en las zonas de mayor subsidencia (IGME 1973, Gallart 1980). Esta subsidencia es mayor en la parte proximal a la Sierra Prelitoral, estando asociada al progresivo levantamiento del labio superior de la falla NW de la fosa durante el Mioceno y Plioceno (Figura 2.2).

Durante el Plioceno (entre 5 y 3 millones de años) se deposita, sobre la formación continental de limos, arcillas y conglomerados sin cementar una formación detrítico gruesa roja, dispuesta en algunos sectores en discordancia erosiva. Esta formación, denominada por Gallart (1980) "*conglomerados del Riudeviltles*", está compuesta por cantos y gravas predominantemente calizos, cementados, con intercalaciones de materiales arenosos y arcillosos, y puede llegar a tener un espesor de hasta 100 m.

Esta formación se dispone en una franja paralela a la falla NW de la fosa, según una forma triangular que tiene su base enraizada en la Sierra Prelitoral. Se extiende unos 10 km hasta Sant Sadurní d'Anoia y tiene como eje el río Riudeviltles.

El Pleistoceno se inicia con la deposición de materiales que darán lugar a una morfología en glacis sobre la formación de conglomerados. A pesar de haberse acumulado de la misma forma que estos, los materiales del glacis son formaciones superficiales donde han actuado los procesos de edafogénesis, y en concreto la cementación de los cantos y gravas por carbonato cálcico, habiéndose desarrollado horizontes petrocálcicos. La Plana de Les Estoses y La Plana del Corral Nou son ejemplos de estas formaciones, que marcan el fin del periodo de acumulación en la fosa y el inicio de la erosión.

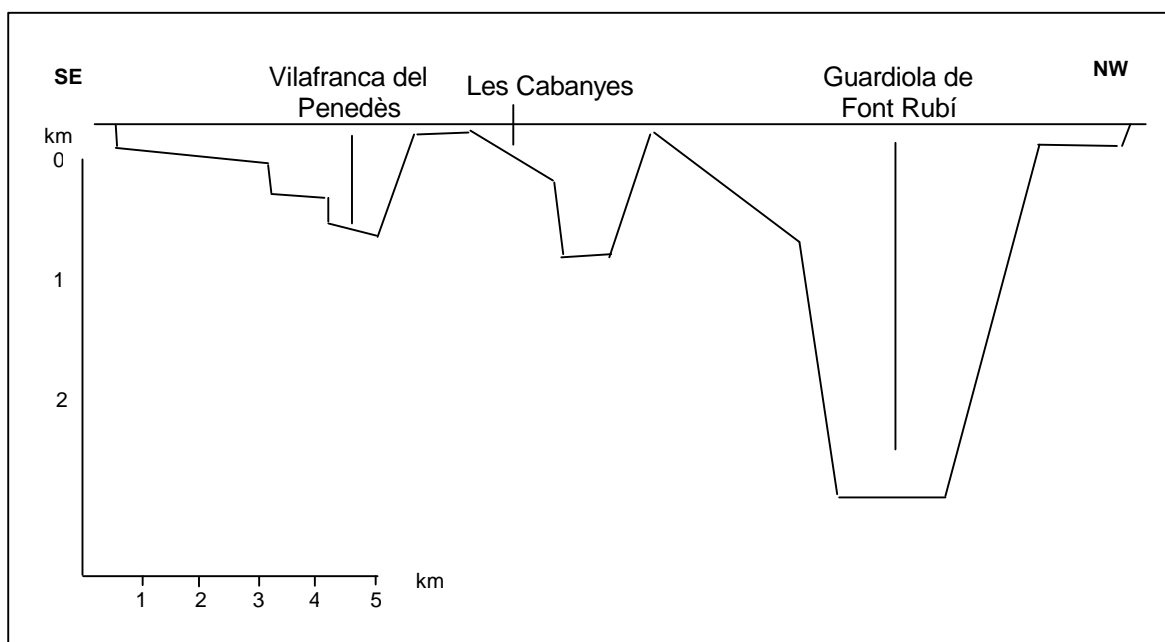


Figura 2.2. Interpretación geológica del perfil gravimétrico transversal de la cuenca del Penedès. Destaca el considerable grosor de los sedimentos neógenos en la parte noroccidental de la cuenca. (Fuente: Casas y Permanyer en Folch 1986).

Es de destacar que las formaciones más importantes de conglomerados se relacionan con el río Riudeviltles y no con el Anoia, por tener el primero un carácter más torrencial respecto al más fluvial del Anoia, cuya cuenca de captación, con mayor superficie, se extiende hasta la cuenca terciaria del Ebro. Este hecho podría haber influido para que en el margen izquierdo del Anoia no se depositasen este tipo de materiales, (tan solo en el área más próxima a la falla: Sierra del Bardoch).

Un origen similar y contemporáneo a los conglomerados del Riudeviltles es el de los materiales denominados de “Piera” (Gallart 1980). Se diferencian de los primeros por la distinta litología de los materiales del área fuente (pizarras paleozoicas). Estos sedimentos fueron depositados en conos de deyección por torrentes con origen en la Sierra Prelitoral (Riera de Can Aguilera, Arroyo del Coral o sus antecesores). Sobre los materiales más superficiales han actuado procesos edafogénicos, que han favorecido el lavado de carbonatos en la parte superior del perfil y la iluviación de arcilla, formándose horizontes argílicos, y cálcicos o petrocálcicos bajo los argílicos.

Todos estos hechos han condicionado el modelado cuaternario del relieve, cuyo rasgo fundamental es el predominio de la erosión y la incisión de la red de drenaje. Las formas en la

depresión se escalonan en tres niveles fundamentales respecto al nivel de base (río Anoia). La formación más elevada (tercer nivel) corresponde a la culminación de los conglomerados del Riudeviltles (140 - 160 m sobre el Anoia). El segundo nivel está representado por amplios glacis, formados por materiales de origen coluvial, elevados entre 35 - 50 m sobre el Anoia, desarrollados sobre materiales aluviales a lo largo de varios periodos de incisión y edafogénesis. En este nivel aparecen restos de horizontes argílicos y horizontes de acumulación de carbonato cálcico, que han sido truncados por la erosión y cubiertos por materiales más recientes. El primer nivel está formado por terrazas y glacis, con una altura relativa de entre 20 - 30 m sobre el nivel del Anoia. Este nivel está bien conservado y en él se han observado procesos de lavado y acumulación de carbonato cálcico, sin cementaciones. El nivel cero está constituido por la llanura aluvial, con un periodo de retorno de 20 - 25 años (Gallart 1980), y en la que actualmente se observa una tendencia al encajamiento.

El relieve en la zona al norte del Río Anoia es significativamente más pronunciado que hacia el sur de los conglomerados del Riudeviltles. Este hecho estaría ligado al juego de la falla Capellades-Vallcarca (Figura 2.1), cuyo labio levantado correspondería a la zona al norte del Anoia. En esta zona, donde afloran materiales neógenos incoherentes, se han encajado una serie de barrancos con paredes casi verticales. Esto pone de manifiesto la poca plasticidad de los materiales que rellenan esta parte de la fosa. En la mayoría de los casos, evolucionan por movimientos en masa caracterizados por desprendimiento de bloques a favor de fisuras paralelas al escarpe. Muchas de las cárcavas y los barrancos tienen un origen antrópico, a favor de antiguos caminos o canales de desagüe de parcelas agrícolas. Actualmente, la gran diferencia de cotas respecto al nivel de base actual y la mencionada incoherencia de los materiales, hacen que el riesgo de disección sea muy elevado en esta zona.

Hacia el sur de los conglomerados del Riudeviltles el paisaje es diferente. El encajamiento de los cursos fluviales es menor y por tanto las diferencias de altitud relativa con respecto al nivel de base local.

La dinámica actual es una tendencia al encajamiento de la red de drenaje, que será mayor en aquellas zonas donde la altitud relativa con respecto al nivel de base actual (río Anoia) sea mayor. En paralelo a este encajamiento se produce una importante denudación de los suelos, por una aceleración de los procesos de erosión laminar y de arroyada, debido a las actuaciones de carácter antrópico. Estas actuaciones han favorecido desde hace varios siglos el aclareo y/o eliminación de la cubierta vegetal del suelo con fines de transformación agrícola, especialmente para la plantación de viñedos.

2.2. Materiales y métodos

2.2.1. Sistema de clasificación de las geoformas (unidades de relieve)

Para la identificación, clasificación y caracterización de las geoformas o unidades de relieve se ha utilizado el sistema de clasificación jerárquica propuesto por Zinck (1988). Este sistema de clasificación se basa en los principios de la teoría jerárquica de Haigh (Zinck y Valenzuela 1990) y tiene 6 niveles que se corresponden con otras tantas categorías, y se ordenan jerárquicamente según diferentes niveles de abstracción (Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Sistema de clasificación de geoformas (Zinck 1988).

| Nivel | Categoría | Concepto genérico | Descripción - Definición |
|-------|------------|----------------------|--|
| 6 | Orden | Geoestructura | Gran área continental caracterizada por su estructura geológica (p.e. cordillera, geosinclinal). |
| 5 | Suborden | Ambiente morfológico | Tipo de medio biofísico originado y controlado por un tipo de geodinámica interna y/o externa (p.e. estructural, deposicional, erosional). |
| 4 | Grupo | Paisaje | Área caracterizada por la repetición de tipos de relieve similar o por una asociación de relieves diferentes (p.e. valle, montaña, pie de monte). |
| 3 | Subgrupo | Relieve | Determinado por una combinación dada de topografía y estructura geológica o bien por condiciones morfoclimáticas específicas (p.e. glacis, terraza, etc.). |
| 2 | Familia | Substrato | Litología y facies. |
| 1 | Subfamilia | Forma del terreno | Geoforma elemental, caracterizada por una única combinación de geometría, dinámica e historia. |

Los atributos o características para clasificar el territorio según este sistema son de 4 tipos:

- a) Atributos morfográficos, descriptores de la geometría de las geoformas: forma topográfica, perfil topográfico, exposición, patrón de la red de drenaje, unidades adyacentes.
- b) Atributos morfométricos, descriptores de las dimensiones de las geoformas: amplitud del relieve, densidad de drenaje, grado de pendiente.
- c) Atributos morfogenéticos, descriptores de la dinámica de las geoformas (origen y evolución): distribución del tamaño de las partículas, estructura de los materiales litológicos, mineralogía y consistencia.
- d) Atributos morfocronológicos, descriptores de las geoformas dentro de un contexto temporal: edad absoluta, edad relativa, estratigrafía.

Para el estudio semidetallado del área de estudio se han utilizado las 4 categorías inferiores del sistema de clasificación: paisaje, relieve, substrato y forma del terreno. A este nivel, la unidad básica de descripción elegida es la unidad de relieve, que puede agrupar, en forma de asociación, a formas del terreno elementales que no pueden ser representadas por si solas a este nivel de detalle.

2.2.2. Cartografía y caracterización morfométrica y morfográfica de las geoformas

El proceso metodológico seguido para la identificación y caracterización de las geoformas se describe esquemáticamente en la Figura 2.3.

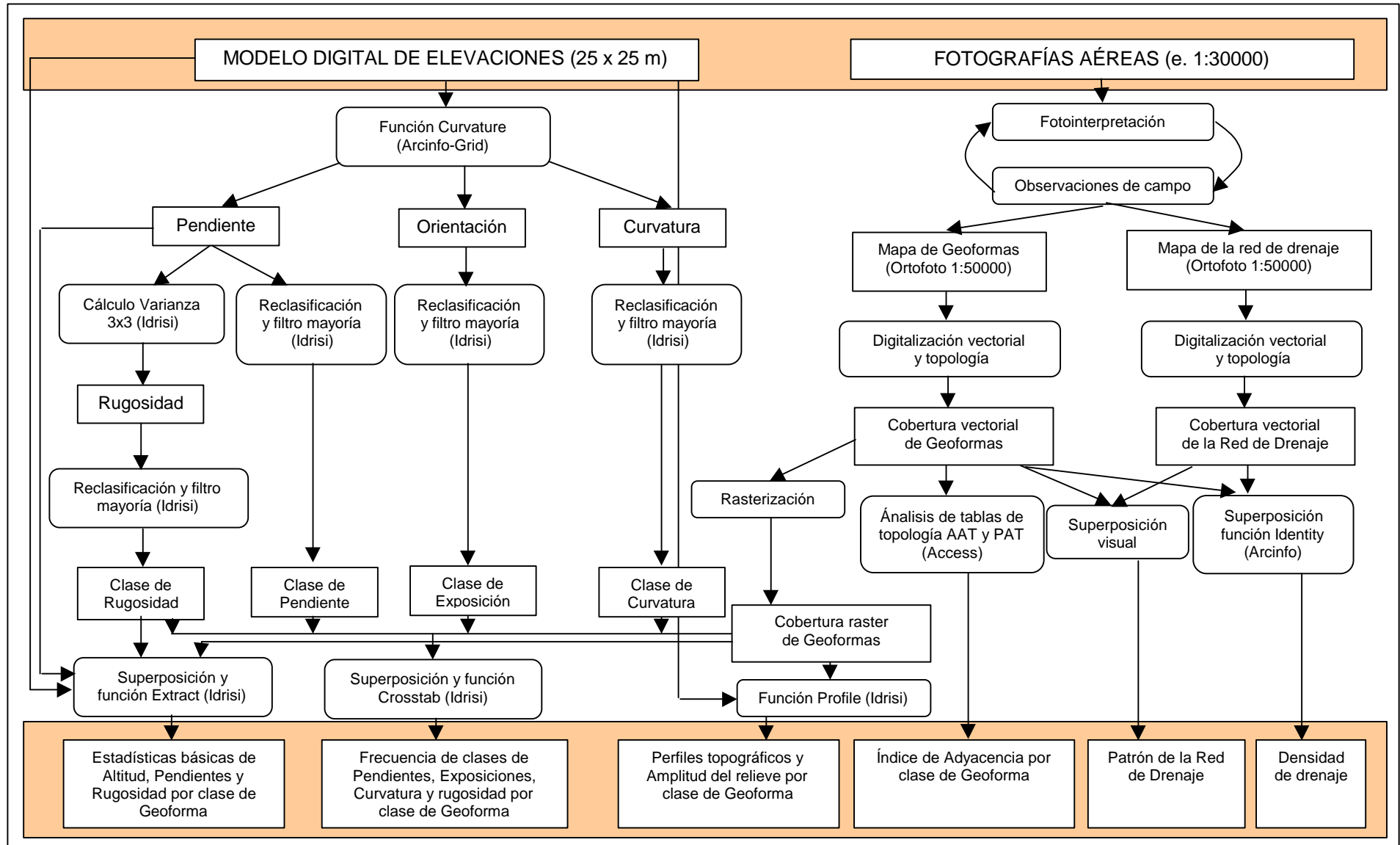


Figura 2.3. Proceso metodológico llevado a cabo para la identificación y caracterización de las geoformas.

La identificación de las geoformas se realizó mediante un proceso iterativo de fotointerpretación de fotografías aéreas, según un enfoque geomorfológico. Las fotografías utilizadas fueron las del vuelo realizado por el Instituto Geográfico Nacional y el Institut Cartogràfic de Catalunya a escala aproximada 1:30.000 en los años 1984 y 1986.

El mapa resultante de la fotointerpretación se utilizó posteriormente en la definición del modelo de suelo-paisaje del área de estudio a escala semidetallada (1:50.000). El mapa de geoformas fue modificado y adaptado según las observaciones de campo llevadas a cabo durante la campaña de descripción de suelos (enero a noviembre 1992). El mapa final fue delineado sobre el ortofotomapa de Cataluña del Institut Cartogràfic de Catalunya a escala 1:50.000 (Hojas núm. 391, 392, 419, 420), y posteriormente digitalizado según un modelo vectorial topológico mediante el SIG Arcinfo. Este mapa o cobertura (en términos SIG) contenía inicialmente delineaciones de las diferentes geoformas, con los atributos de área, perímetro, de la delineación o polígono y código de la geoforma.

La caracterización de las geoformas se realizó en base a los atributos descriptores que contempla el sistema de clasificación adoptado (Zinck 1988).

A. Atributos morfográficos.

A.1. Forma topográfica.

Fue deducida de la fotointerpretación geomorfológica y observaciones de campo.

A.2. Perfil topográfico.

Se realizaron entre 6 y 10 perfiles topográficos (transversales y longitudinales) para cada geoforma, utilizando el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) del Servicio Geográfico del Ejército de 25 m de resolución. Para la obtención de los perfiles se utilizó la función "Profile" del programa Idrisi.

A.3. Exposición.

Fue obtenida a partir del MDE de 25 m de resolución mediante la función "Curvature-Aspect" de Arcinfo-Grid. Esta función calcula la dirección espacial respecto al norte (medida para cada submatriz de 3x3 celdas del MDE) en la que se produce el máximo cambio de la altura: dirección de la máxima pendiente. Posteriormente los valores de acimut se reclasificaron en las clases Norte (0-45° y 315-360°), Este (45-135°), Sur (135-225° y terrenos con pendiente llana) y Oeste (225-315°).

La cobertura de exposiciones obtenida fue modificada en Idrisi mediante un filtro de mayoría para eliminar las celdas aisladas con clase de exposición diferente a las de su entorno. La distribución de frecuencias de clases de exposición por clase de geoforma se obtuvo aplicando la función "Crosstab" de Idrisi a las coberturas de exposiciones y de geoformas.

A.4. Red de drenaje y patrón de drenaje.

La red de drenaje se obtuvo a partir de la fotointerpretación de fotografías aéreas de escala 1:30.000. Fue delineada sobre el ortofotomapa a escala 1:50.000 para su georeferenciación y digitalización vectorial. Para obtener la red de drenaje completa, evitando errores de fotointerpretación, la red de drenaje obtenida por fotointerpretación fue comparada con la obtenida automáticamente a partir del MDE de 25 m de resolución según el procedimiento experimental propuesto por Martínez-Casasnovas and Stuver (1998). Para obtener la red de drenaje de forma automática se usó el programa Arcinfo-Grid, aplicando un valor umbral de área de drenaje de 38 celdas para el área al norte del río Anoia, y de 63 celdas para el área al sur del río Anoia (con tipo de relieve diferente).

A cada elemento de la red de drenaje le fue asociado como atributo su tipo: cárcava, barranco, torrente, fondo, etc.

El patrón de drenaje en cada unidad de paisaje se dedujo por interpretación visual de la red superpuesta a la cobertura vectorial de las geoformas.

A.5. Adyacencia o relación de vecindad entre geoformas.

Se determinó a partir del índice de adyacencia o de relación de vecindad. El índice de adyacencia de la geoforma X con respecto a la geoforma Y se define como la relación entre el perímetro común entre las unidades X e Y y el perímetro total de la unidad X.

Este índice se obtuvo mediante la operación en las tablas de topología de polígonos (pat.dbf) y de líneas (aat.dbf) asociadas a la cobertura vectorial de las geoformas. Con este fin se escribió un programa en lenguaje SQL de Microsoft Access que se presenta como uno de los resultados de la presente investigación (sección 5.1).

El índice de adyacencia se ha clasificado según el criterio de la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Clases de adyacencia entre geoformas.

| Clase de adyacencia de la unidad X con respecto a la unidad Y | Porcentaje (%) de perímetro de la unidad X compartido con la unidad Y |
|---|---|
| Baja | < 10 |
| Media | 10 – 25 |
| Alta | 25 – 50 |
| Muy alta | > 50 |

B. Atributos morfométricos.

B.1. Amplitud del relieve o relieve interno.

Se define como la media de las diferencias en metros entre divisorias locales y fondos de valle, dentro de una geoforma (Meijerink 1988). Este atributo es un indicador de la energía

potencial media disponible en la unidad de terreno considerada para remover materiales de las vertientes: a mayor amplitud mayor será el efecto de los agentes erosivos actuantes.

Se ha medido a partir de los perfiles topográficos realizados sobre el modelo digital de elevaciones mediante la función “Profile” de Idrisi.

Las clases de amplitud de relieve consideradas para su evaluación son las propuestas por Meijerink (1988) (Tabla 2.3).

Tabla 2.3. Clases de amplitud de relieve o relieve interno (Meijerink 1988).

| Clase | Intervalo de amplitud de relieve (m) |
|---------------------|--------------------------------------|
| Llano o casi llano | 0 - 1.5 |
| Escaso o intermedio | 1.5- 10 |
| Moderado | 10 – 20 |
| Relativamente alto | 20 – 35 |
| Alto | 35 – 50 |
| Muy alto | > 50 |

B.2. Densidad de drenaje.

Fue definida por Horton (1945) como la suma de la longitud de los elementos de drenaje en relación a la superficie considerada. Es una de las propiedades más relevantes en la descripción morfométrica de cuencas y unidades geomorfológicas, ya que es una medida del grado de disección del paisaje. También es indicativa de la capacidad del paisaje para transportar los materiales erosionados (Stocking 1972, Millington 1986) y ha sido usada como índice de la severidad de erosión (Gregory y Gardiner 1975, Iona 1972 y Mikhailov 1972 en Millington 1986). Otros autores consideran que refleja las áreas más expuestas a la fuerza erosiva del agua (Hernández 1991). A pesar de estas afirmaciones, la densidad de drenaje debe ser considerada como un índice de la escorrentía que se produce en un área más que como un índice de erosión (Morgan 1973, Sheng 1990).

La densidad de drenaje se obtuvo mediante la superposición vectorial con la función “Identity” de Arcinfo entre la cobertura de la red de drenaje y la cobertura de geoformas. El valor de la densidad de drenaje se evaluó según el criterio propuesto por Meijerink (1988) (Tabla 2.4).

Tabla 2.4. Clases de densidad de drenaje (adaptado de Meijerink 1988).

| Clase | Intervalo de densidad de drenaje km km ² |
|---------------|---|
| Baja | < 0.5 |
| Baja-Moderada | 0.5 - 1.5 |
| Moderada | 1.5 - 3.0 |
| Moderada-Alta | 3.0 - 7.5 |
| Alta | 7.5 - 20 |
| Muy alta | > 20 |

B.3. Pendiente.

Es el grado de cambio de la elevación del terreno en relación a la distancia en las direcciones X y/o Y. En relación a los procesos de génesis y dinámica del paisaje y de los

suelos, actúa como agente en el transporte de partículas, tanto por gravedad como por la escorrentía superficial. Es uno de los descriptores del relieve más correlacionados con la erosión, y usado por ello en la mayoría de los modelos de predicción de erosión, tanto cualitativos como cuantitativos.

Para la determinación de la pendiente, al igual que para otras variables topográficas como la curvatura y rugosidad (variabilidad espacial de la pendiente) se ha usado el modelo digital de elevaciones de 25 m, aplicando la función “Curvature” de Arcinfo-Grid. Esta función considera un polinomio de 4º orden (Zevenbergen y Thorne 1987, Moore *et al.* 1991), que se ajusta a la superficie del terreno (representada por el modelo digital de elevaciones, Figura 2.4) (Ecuación 2.1).

Ecuación 2.1 $Z = AX^2Y^2 + BX^2Y + CXY^2 + DX^2 + EY^2 + FXY + GX + HY + I$

Los coeficientes de esta ecuación son calculados para cada submatriz de 3x3 celdas del MDE según las siguientes ecuaciones (Ecuación 2.2).

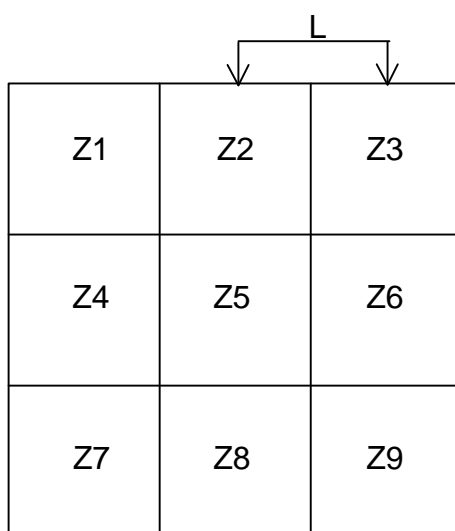


Figura 2.4. Representación de una submatriz de 3x3 celdas del Modelo Digital de Elevaciones. Los valores Zi representan la altitud en el punto central de la celda y L es la distancia entre celdas o resolución del MDE.

Ecuación 2.2

$$A = [(Z_1+Z_3+Z_7+Z_9)/4 - (Z_2+Z_4+Z_6+Z_8)/2 + Z_5] / L^4$$

$$B = [(Z_1+Z_3-Z_7-Z_9)/4 - (Z_2-Z_8)/2] / L^3$$

$$C = [(-Z_1+Z_3-Z_7+Z_9)/4 + (Z_4-Z_6/2)] / L^3$$

$$D = [(Z_4+Z_6)/2 - Z_5] / L^2$$

$$E = [(Z_2+Z_8)/2 - Z_5] / L^2$$

$$F = (-Z_1+Z_3+Z_7-Z_9) / 4L^2$$

$$G = (-Z_4+Z_6) / 2L$$

$$H = (Z_2 - Z_8) / 2L$$

$$I = Z_5$$

A partir de estas relaciones, la pendiente, que representa la primera derivada de la altitud en el espacio, se calculó según la Ecuación 2.3.

Ecuación 2.3 $\tan \Xi = [(*Z/*X)^2 + ((*Z/*Y)^2)]^{-1/2} \quad [m \ m^{-1}]$

$$\tan \Xi = (G^2 + H^2)^{-1/2} \quad [m \ m^{-1}]$$

Siendo G y H los coeficientes de la Ecuación 2.2.

Una vez calculada la pendiente (en %) se reclasificó según los intervalos de clase propuestos por el Soil Conservation Service (1981). Finalmente a la cobertura resultante se le aplicó un filtro de mayoría para reducir la variabilidad.

B.4. Curvatura.

Es una variable topográfica que representa el grado de cambio de la pendiente en el espacio. Tiene componentes en dos direcciones: planta y perfil.

- Curvatura en perfil: es la curvatura de la superficie del terreno en la dirección de la pendiente. Mide el grado de cambio de la pendiente, que afecta a la aceleración o deceleración del flujo del agua e influencia la erosión y deposición.
- Curvatura en planta: es la curvatura en la dirección perpendicular a la pendiente. Mide la divergencia o convergencia del flujo del agua y por tanto de la concentración de agua en el paisaje.

A nivel de cálculo la curvatura representa la segunda derivada de la altitud en el espacio (Ecuación 2.4).

Ecuación 2.4 $C = (*^2Z/*X^2) + (*^2Z/*Y^2)$

La función “Curvature” de Arcinfo-Grid empleada para el cálculo se basa en la función polinómica de ajuste al modelo digital de elevaciones (Ecuación 2.1). Las curvaturas en sentido direccional y la curvatura se calculan según las siguientes ecuaciones.

Ecuación 2.5 $C_{\text{perfil}} = 2 (DG^2 + EH^2 + FGH) / (G^2 + H^2)$

$$C_{\text{planta}} = -2 (DG^2 + EH^2 - FGH) / (G^2 + H^2)$$

$$C = C_{\text{planta}} - C_{\text{perfil}} = -2 (D + E) \quad [m \ m^{-2}]$$

Una vez obtenida la curvatura, el criterio de reclasificación de los valores obtenidos fue: curvatura > 0.2, superficie convexa; curvatura entre -0.2 y 0.2, superficie rectilínea; curvatura < -0.2, superficie cóncava. Tras la reclasificación la cobertura fue homogeneizada mediante un filtro de mayoría.

B.5. Rugosidad.

Es una medida de la variación del relieve en el espacio. Diversos autores han aplicado métodos distintos para su evaluación como: la pendiente media, desviación estándar de la altitud, dispersión de vectores de altitud, etc. (Felicísimo 1994).

Como estimador de la rugosidad se utilizó la varianza de la pendiente, calculada en submatrices de 3x3 celdas a partir del modelo digital de elevaciones de 25 m. Este índice define bien formas como las rupturas de pendiente, tanto en su parte inferior (valles) como en su parte superior (divisorias), (Felicísimo 1994).

Para el cálculo de la rugosidad se implementó un procedimiento en Idrisi, que utiliza una submatriz o filtro de 3x3 celdas que opera en el entorno de cada celda de la cobertura de pendientes para el cómputo de su varianza.

Las clases de rugosidad consideradas se reclasificaron según el criterio de la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Clases de rugosidad del terreno (varianza de la pendiente).

| Clase de rugosidad | Intervalo de varianza de la pendiente |
|--------------------|---------------------------------------|
| Muy baja | 0 – 1 |
| Baja | 1 – 5 |
| Moderada | 5 – 15 |
| Alta | 15 – 50 |
| Muy alta | > 50 |

2.3. Resultados y discusión

2.3.1. Descripción general de las unidades de paisaje

Como resultado del análisis geomorfológico del área de estudio se han distinguido 5 grandes unidades de paisaje. Estas son: Área de montaña (Sierra Prelitoral), Área de pie de monte, Área de vertientes y barrancos (al norte del río Anoia), Área de relieve suavemente ondulado (Pla del Penedès) y Área de niveles aluviales recientes (Figura 2.5).

La unidad de paisaje de montaña corresponde a la Sierra Prelitoral (unidad A), límite natural de la Depresión del Penedès, y de la cual interesan las características litológicas de sus diferentes subunidades, ya que condicionan los elementos detríticos que aportan a la depresión y que tienen influencia en el modelado del relieve.

Adosadas a la Sierra Prelitoral se encuentran extensas superficies llanas de pie de monte (unidad B), formadas por acumulación detrítica de cantos rodados y gravas calcáreas cementadas, con intercalaciones de materiales arenosos y arcillosos. Algunas están recortadas por la incisión de la red de drenaje a diferentes niveles, estando elevadas unos 110-160 m sobre los cauces principales de la depresión, habiendo dado lugar a plataformas residuales. Las extensiones más importantes de estas formas y formaciones antiguas están relacionadas al río Riudevittles: Plana de les Estoses, del Corral Nou y del Carrer de Can Rossell. En la zona

de Piera (Planas de Mas Marquet) se encuentra otra gran extensión llana de pie de monte, aunque con diferencias en cuanto a la litología de los materiales (detríticos terrígenos procedentes de la alteración de materiales paleozoicos). Esta última área limita bruscamente con la profunda incisión de la red de drenaje, iniciada en la parte central y distal de la depresión.

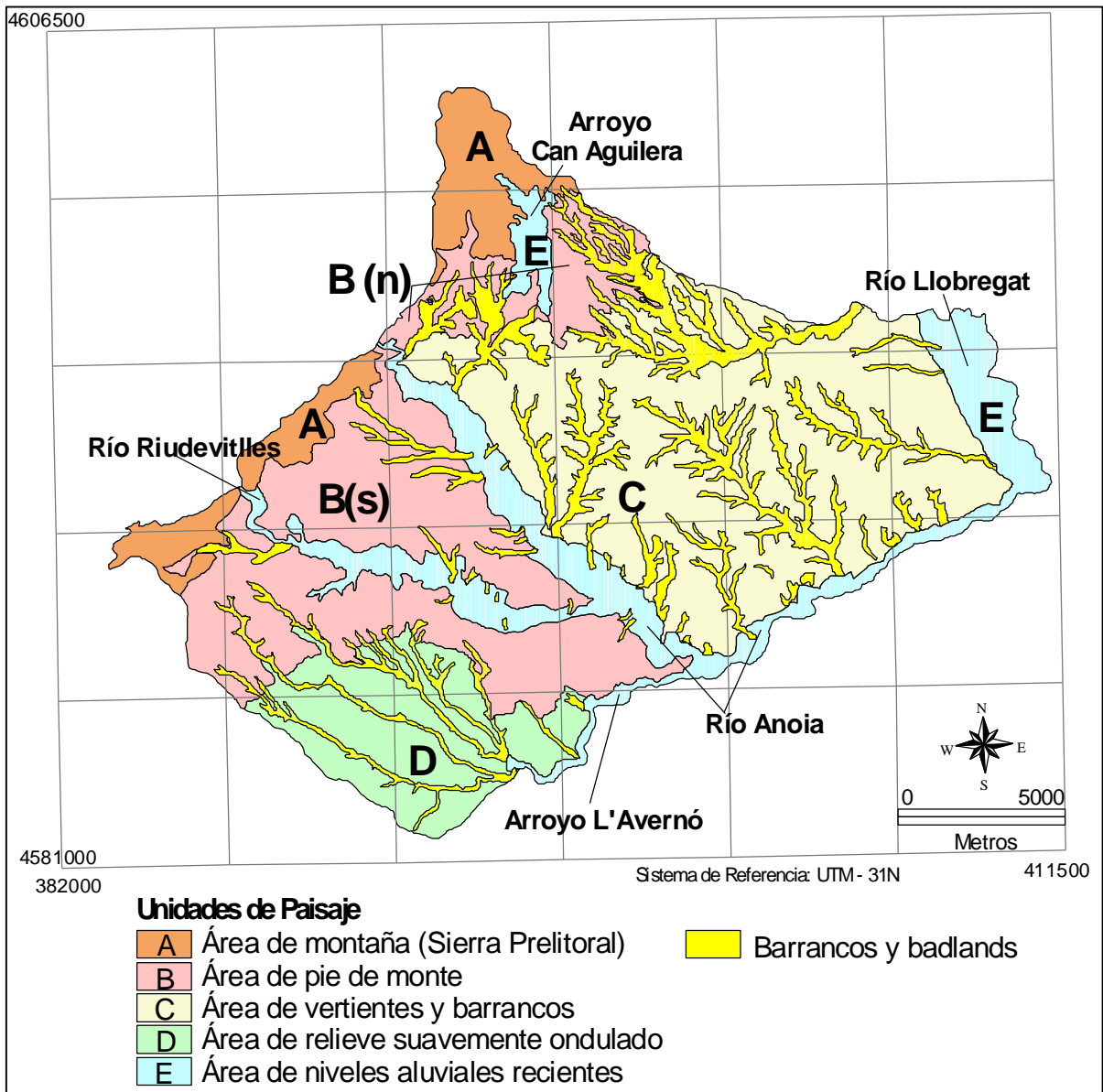


Figura 2.5. Unidades de Paisaje del área de estudio (Alt Penedès – Anoia). (Mapa elaborado a partir de la fotointerpretación de fotografías aéreas y posterior georeferenciación y digitalización vectorial). (Bn indica zona norte de la unidad de paisaje B, y Bs indica zona sur de la unida de paisaje B).

Al norte del río Anoia se extiende la unidad de vertientes y barrancos (unidad C). Se caracteriza por la escasez de materiales cementados: arcillas, areniscas y lentejones de conglomerados de edad miocena, que se traduce en una falta de relieves residuales significativos. El rasgo fundamental es el dominio de las vertientes, generalmente complejas,

con pendientes suaves a moderadamente escarpadas, que culminan en estrechas divisorias redondeadas, y que están abruptamente recortadas por la red de drenaje.

La unidad de paisaje de relieve suavemente ondulado (unidad D) se extiende desde el pie de las plataformas residuales (al sur del río Riudevílles) hasta la riera del Avernó (límite sur). Se encuentra 120-130 m por debajo del nivel de dichas plataformas. Aflora una serie sedimentaria miocena de facies perideltaica, que en algunos puntos produce relieves residuales. Estas formas, al alternarse con amplias llanuras aluviales, conforman el tipo de relieve mencionado. La red de drenaje es paralela, menos densa que en la zona al norte del río Anoia, y atraviesa la depresión de NW a SE.

Por último, se ha diferenciado la unidad de paisaje con relieves asociados a los sedimentos aluviales recientes de los cauces actualmente funcionales: llanuras de inundación y terrazas (unidad E).

2.3.2. Mapa de geoformas

El mapa de la Figura 2.6 muestra el resultado del análisis geomorfológico de identificación, delineación y clasificación de las geoformas (unidades de relieve). La Tabla 2.6 recoge la leyenda del mapa y Tabla 2.7 resume los atributos topográficos que se han utilizado posteriormente en la descripción de las unidades.

Tabla 2.6. Leyenda del mapa de geoformas del Alt Penedès-Anoia.

| Unidad de Paisaje | Geoformas | Código Mapa |
|---|--|-------------|
| Montaña (Sierra Prelitoral) | Vertientes escarpadas (pendiente >25 %) | A |
| Pie de monte | Plataformas residuales poco disectadas, elevadas 140-160 m sobre los cauces principales del área, (pendiente 5-15 %) | B11 |
| | Plataformas residuales moderadamente disectadas, elevadas 90-110 m sobre los cauces principales del área, (pendiente 5-15 %) | B12 |
| | Plataformas residuales disectadas, elevadas 140-160 m sobre los cauces principales del área (pendiente 5-15 %) | B13 |
| | Glacis (pendiente 5-15 %) | B2 |
| | Vertientes suave o moderadamente inclinadas (pendiente 1-10 %) | B31 |
| | Vertientes moderadamente inclinadas (pendiente 5-15 %) | B32 |
| | Vertientes complejas fuertemente inclinadas (pendiente 5-15 %) | B33 |
| | Vertientes moderadamente escarpadas o escarpadas (pendiente 20-30 %) | B34 |
| | Fondos (pendiente 5-15 %) | B4 |
| Vertientes y barrancos | Divisorias redondeadas (pendiente 5-15 %) | C1 |
| | Vertientes complejas fuertemente inclinadas (pendiente 5-15 %) | C21 |
| | Vertientes complejas fuertemente inclinadas o colinadas (pendiente 10-20 %) | C22 |
| | Vertientes complejas colinadas (pendiente 15-20 %) | C23 |
| | Vertientes moderadamente escarpadas a escarpadas (pendiente 20-30 %) | C24 |
| Relieve suavemente ondulado (Pla del Penedès) | Asociación de divisorias y vertientes moderadamente inclinadas (pendiente 5-10 %) | D1 |
| | Vertientes cóncavas suavemente inclinadas (pendiente 1-5 %) | D21 |
| | Vertientes en glacis y antiguas llanuras aluviales (pendiente 1-10 %) | D22 |
| | Vertientes cóncavas moderada o fuertemente inclinadas (pendiente 5-10 %) | D23 |
| | Vertientes moderadamente escarpadas (pendiente 10-20 %) | D24 |
| | Fondos (pendiente 5-10 %) | D3 |
| Niveles aluviales recientes | Llanuras aluviales (pendiente 1-10 %) | E1 |
| | Asociación de llanuras aluviales y terrazas (pendiente 5-10 %) | E2 |
| | Terrazas bajas (pendiente 5-15 %) | E31 |
| | Terrazas medias (pendiente 5-15 %) | E32 |
| | Asociación de terrazas y glacis coluviales (pendiente 5-15 %) | E33 |
| Áreas misceláneas | Áreas urbanas, industriales y de extracción | M1 |
| | Barrancos y badlands | M2 |

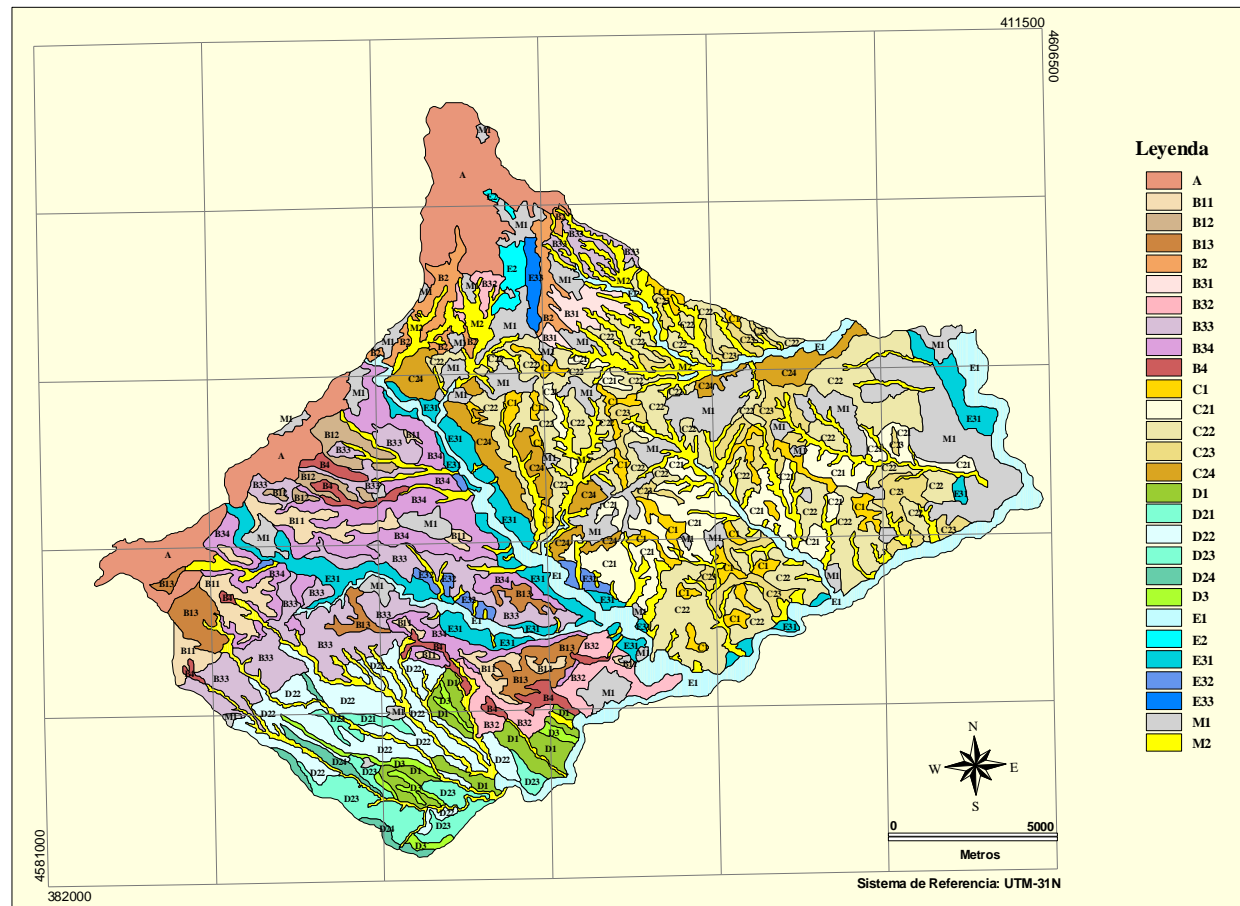


Figura 2.6. Mapa de geomorfos del Alt Penedès - Anoia. Escala original 1:50.000. (Ver leyenda con la descripción de las geomorfos en la Tabla 2.6). (Mapa elaborado a partir de la fotointerpretación de fotografías aéreas y posterior georeferenciación y digitalización vectorial en ArcInfo).

Tabla 2.7. Atributos topográficos descriptores de las geoformas.

| Código Unidad | Área (ha) | Altitud media (m) | Desv. Estand. Altitud | Pendiente media (%) | Desv. Estand. Pendiente | Intervalo pendientes mayoritarias | Varianza media de la pendiente (Rugosidad) | Relieve interno (m) | Desv. Estand. Relieve interno | Densidad de drenaje (km km ⁻²) | Índice adyacencia a barrancos (% perímetro) | Formas cóncavas (% superficie) | Formas rectilíneas (% Superficie) | Formas convexas (% Superficie) |
|---------------|-----------|-------------------|-----------------------|---------------------|-------------------------|-----------------------------------|--|---------------------|-------------------------------|--|---|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| A | 2045.2 | 508 | 91.3 | 26.6 | 30.5 | 25-45 | 43.8 | 40.7 | 35.3 | 3 | 5.6 | 34.8 | 24.7 | 40.5 |
| B11 | 778.4 | 366 | 58.2 | 12.0 | 7.6 | 5-15 | 15.5 | 6.9 | 3.4 | 0.6 | 2.7 | 12.6 | 55.8 | 31.6 |
| B12 | 284.7 | 334 | 30.3 | 13.6 | 7.7 | 5-15 | 20.3 | 16.1 | 13.3 | 1.4 | 21.8 | 19.2 | 50.5 | 30.2 |
| B13 | 599.7 | 320 | 87 | 14.8 | 8 | 5-20 | 22.3 | 22.8 | 11.1 | 2.6 | 6.8 | 25.8 | 41.9 | 32.1 |
| B2 | 445.1 | 344 | 51.9 | 12.3 | 7.7 | 5-15 | 13.5 | 8.7 | 7.5 | 2.9 | 39.9 | 15.6 | 58.9 | 25.3 |
| B31 | 222.0 | 326 | 17.5 | 9.9 | 6.4 | 1-10 | 11.2 | 16.6 | 10.6 | 3.7 | 52.8 | 14.8 | 64.9 | 20.1 |
| B32 | 561.1 | 212 | 58.3 | 11.0 | 5.8 | 5-15 | 8.4 | 21.2 | 14.1 | 1.8 | 30.2 | 14.5 | 65.1 | 20.3 |
| B33 | 1954.7 | 298 | 50.1 | 13.9 | 7.5 | 5-15 | 16.5 | 14.8 | 8.0 | 2.8 | 40.7 | 21.9 | 51.3 | 26.7 |
| B34 | 1628.5 | 305 | 54.9 | 23.7 | 10.8 | 20-45 | 38.7 | 25.2 | 14.0 | 1.8 | 14.7 | 28.8 | 33.5 | 37.7 |
| B4 | 342.5 | 273 | 67.7 | 13.7 | 7.2 | 5-15 | 17.4 | 15.7 | 10.2 | 5.3 | 12.6 | 28.5 | 51.3 | 20.1 |
| C1 | 753.5 | 244 | 59.7 | 13.0 | 7.2 | 5-15 | 15.8 | 13.4 | 10.6 | 0.8 | 11.2 | 15.3 | 51.4 | 33.3 |
| C21 | 1388.6 | 197 | 51.8 | 14.6 | 8.6 | 5-15 | 19.6 | 15.2 | 7.8 | 2.1 | 50.9 | 18.2 | 49.5 | 32.2 |
| C22 | 3532.3 | 207 | 65.4 | 14.9 | 8.2 | 5-20 | 19.8 | 18.6 | 8.3 | 2.4 | 45.4 | 21.2 | 47.8 | 30.8 |
| C23 | 958.1 | 201 | 60.3 | 17.5 | 8.5 | 10-20 | 23.3 | 20.3 | 8.6 | 2.3 | 39.3 | 23.6 | 39.6 | 36.7 |
| C24 | 885.8 | 244 | 42.6 | 23.5 | 10.7 | 20-45 | 36.5 | 20.5 | 10.4 | 2.5 | 22.6 | 32.7 | 26.6 | 40.6 |
| D1 | 502.4 | 202 | 20.3 | 7.8 | 4.8 | 5-10 | 5.2 | 5.6 | 5.1 | 0.7 | 33.4 | 8.1 | 77.0 | 14.9 |
| D21 | 55.6 | 225 | 10.7 | 5.5 | 3.2 | 1-5 | 2.5 | 7.7 | 5.2 | 0.1 | 12.9 | 7.5 | 86.1 | 6.3 |
| D22 | 1281.3 | 237 | 34.9 | 8.5 | 5.9 | 1-10 | 8.5 | 13.7 | 8.4 | 1.4 | 57.4 | 10.3 | 71.5 | 18.1 |
| D23 | 589.0 | 223 | 28.4 | 7.2 | 3.5 | 5-10 | 2.5 | 17.0 | 17.1 | 1.8 | 36.8 | 6.5 | 85.0 | 8.3 |
| D24 | 173.3 | 257 | 24.5 | 12.3 | 5.4 | 5-20 | 8.2 | 19.1 | 9.9 | 1.7 | 27.3 | 17.3 | 69.7 | 12.8 |
| D3 | 226.3 | 217 | 24.6 | 7.3 | 3.1 | 5-10 | 2.6 | 5.7 | 4.3 | 6.0 | 4.7 | 12.3 | 79.0 | 8.5 |
| E1 | 2032.2 | 188 | 57.6 | 11.6 | 9.2 | 1-10 | 19.2 | 11.5 | 2.1 | 5.3 | 20.5 | 28.3 | 59.3 | 12.5 |
| E2 | 142.2 | 354 | 37.9 | 9.3 | 5.1 | 5-10 | 6.1 | 6.1 | 5.5 | 3.2 | 10.4 | 17.3 | 66.4 | 16.2 |
| E31 | 1338.8 | 188 | 70.9 | 11.8 | 8.2 | 5-15 | 13.0 | 13.7 | 8.2 | 2.2 | 10.1 | 16.3 | 65.5 | 18.1 |
| E32 | 168.2 | 211 | 48.3 | 14.6 | 8.7 | 5-15 | 18.2 | 26.2 | 8.7 | 0.8 | 40.5 | 11.3 | 54.6 | 34.0 |
| E33 | 104.6 | 353 | 21.8 | 10.6 | 4.5 | 5-15 | 7.6 | 11.1 | 4.5 | 1.7 | 0 | 23.9 | 54.1 | 21.8 |

2.3.3. Descripción y análisis de las geoformas

Como información previa a la descripción y análisis de las geoformas de cada unidad de paisaje, la Figura 2.7 muestra la localización de los perfiles topográficos realizados para apoyar dicha descripción.

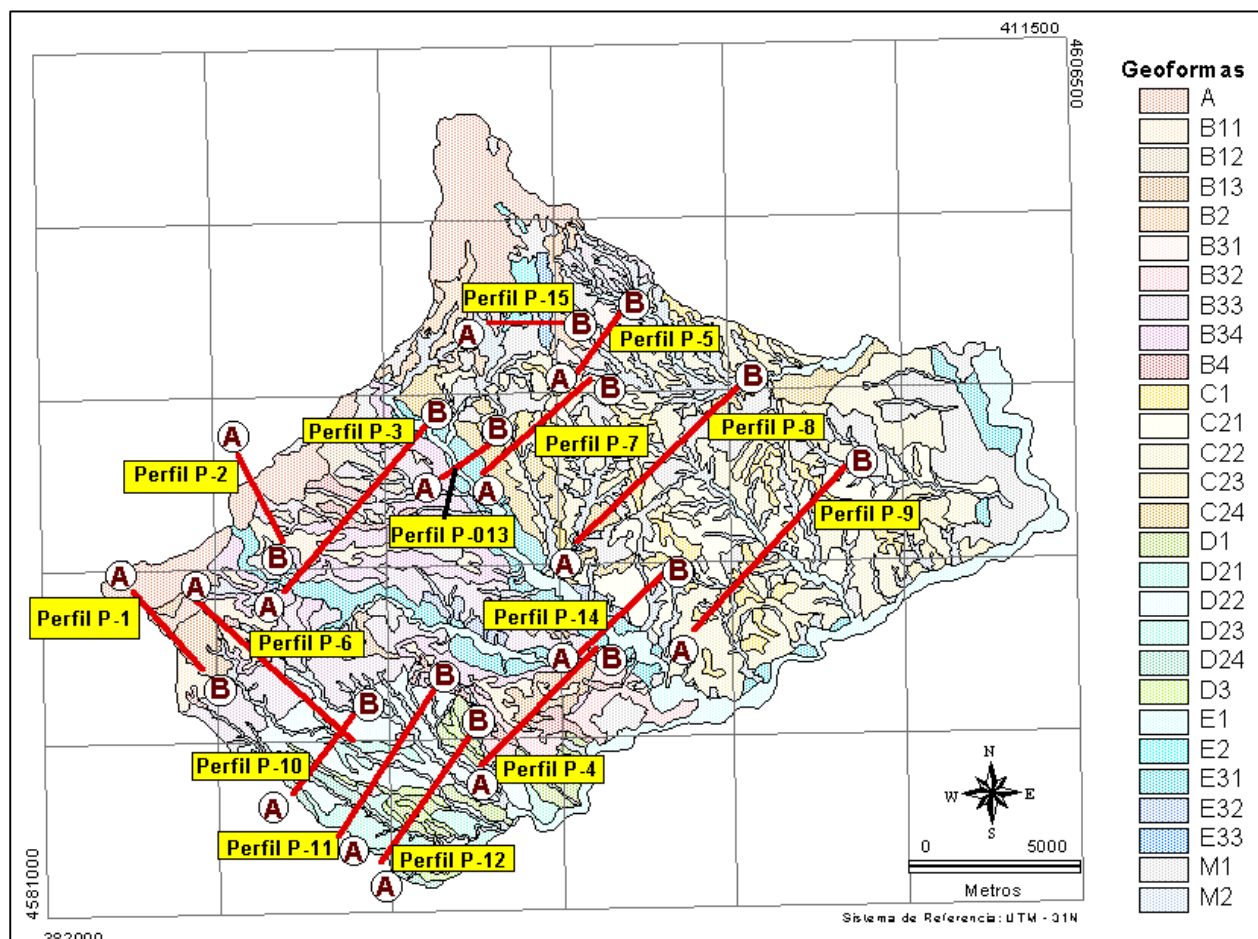


Figura 2.7. Localización de los perfiles topográficos para la descripción morfológica de las geoformas.

2.3.3.1. Unidad de paisaje de montaña (Sierra Prelitoral)

- Situación.

Representa el límite W y NW del área de estudio, habiéndose tomado como límite la divisoria de la Sierra que vierte hacia la Depresión del Penedès. Es atravesada por los cauces principales que drenan la depresión: el río Riudevilles (Sant Quintí de Mediona) y el río Anoia (en Capellades y Vallbona d’Anoia).

Esta unidad de paisaje se ha incluido dentro del área de estudio por ser un límite natural de la Depresión del Penedès y por su relación con el origen de los materiales que la rellenan, que influyen en el modelado del relieve (Figura 2.8).



Figura 2.8. Relieve característico de la unidad de paisaje de montaña (Sierra Prelitoral).

- Litología y estructura geológica.

La litología de esta unidad es diversa, predominando los materiales mesozoicos en la zona sur y centro y los paleozoicos en la zona norte.

Los materiales mesozoicos son predominantemente carbonatados (IGME 1973):

- Dolomías bréchicas o brechas poligénicas con cemento dolomítico del Jurásico.
- Arcillas dolomíticas, dolomías arcillosas y calcilitas del Keuper.
- Calizas dolomíticas, dolomías, calcilitas, yesos y areniscas rojas del Mulchelkalk.

El Paleozoico está representado en la zona central de la sierra Prelitoral por un manchón de materiales pizarrosos al norte de Sant Quintí de Mediona. Estos materiales abundan también en la parte norte de la sierra (cuenca de la riera de Aguilera). En la zona de Capellades-Vallbona, y fundamentalmente dentro del conjunto paleozoico, aflora un pequeño plutón granodiorítico de bordes netos (IGME 1975a).

En relación a la estructura geológica, esta unidad constituye la vertiente SE del denominado Bloque del Gayà u Horst Prelitoral (IGME 1973), que limita con la Depresión del Penedès en la falla o accidente de Sant Quintí de Mediona.

- Red de drenaje.

La densidad de drenaje de esta unidad es 3 km km^{-2} . Generalmente, los elementos de la red se encajan formando valles en V, con las paredes protegidas por el crecimiento de vegetación arbórea y arbustiva.

- Geoformas.

El tipo de relieve de la unidad es montañoso (Figura 2.8), con pendientes escarpadas o muy escarpadas ($>25\%$, Figura 2.9 y Figura 2.10). La exposición predominante es sur y este. La amplitud de relieve media es de 40.7 m, con frecuencias mayoritarias en los intervalos 20-25 m y 50-100 m. Esta amplitud es la mayor de toda el área de estudio (a excepción del área de barrancos) y concuerda con la alta variabilidad de las pendientes (varianza media 43.8).

La forma de las vertientes más frecuente es la convexa, que junto con el alto grado de pendiente existente es indicativo de algunas características de los suelos que pueden desarrollarse: poco profundos y sometidos a una continua renovación de los materiales en superficie.

Esta unidad limita principalmente con geoformas del área de pie de monte (plataformas y glacia). No se han distinguido unidades menores de relieve por no ser esta unidad objetivo específico del estudio, aunque se pueden observar tramos de vertientes con diferente grado de pendiente (10-25 %).

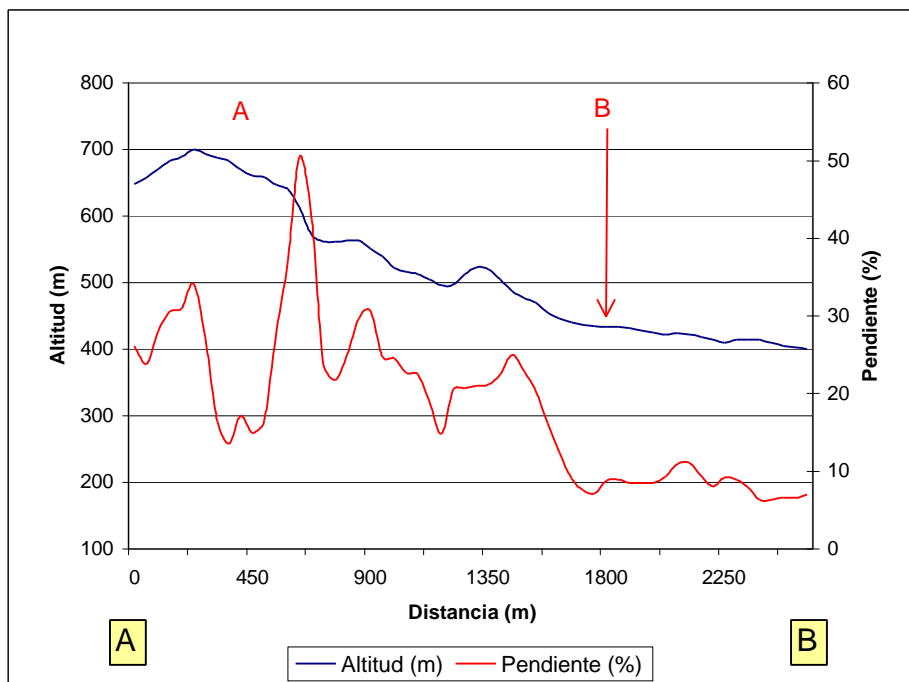


Figura 2.9. Perfil topográfico y de pendiente P-1. (Perfiles obtenidos a partir del modelo digital de elevaciones y de pendientes. Las letras en el interior del gráfico indican los códigos de la leyenda del mapa de geoformas, Tabla 2.6).

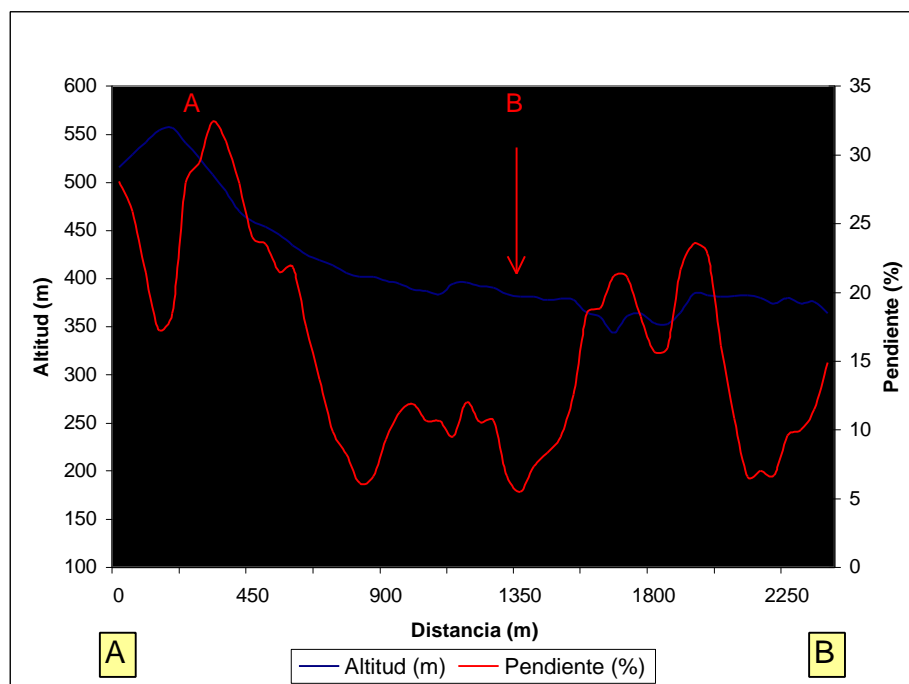


Figura 2.10. Perfil topográfico y de pendiente P-2.

2.3.3.2. Unidad de paisaje de pie de monte

- Situación.

Unidad de paisaje adosada a la Sierra Prelitoral y que se extiende de forma desigual hasta la parte central de la depresión. Se caracteriza por la presencia de formas tabulares (plataformas residuales), elevadas unos 110-160 m sobre los cauces de los ríos Anoia y Riudevittles. De estas formaciones destacan la Plana de les Estoses, la Plana del Corral Nou (Sant Quintí de Mediona) y la Plana del Carrer de Can Rosell.

En la zona de Piera - Hostalets de Pierola (Plana de Mas Marquet) se extienden otras superficies planas de pie de monte de diferentes características que las anteriores. Están recortadas por la profunda incisión de barrancos. Estas superficies planas no forman niveles residuales elevados.

- Litología y estructura geológica.

Se distinguen dos tipos de formaciones, relacionadas con la diferente litología de los materiales de origen.

Las formaciones relacionadas con las áreas de la sierra donde abundan los materiales calcáreos mesozoicos son formaciones continentales de carácter detrítico de color rojo. Corresponden al Mioceno superior fluviotorrencial (Guigon *et al.* 1973 en Gallart, 1981). Tienen una potencia de 100 m y culminan con un glacis atribuible al cuaternario antiguo (Gallart 1981). Se caracterizan por la presencia de conglomerados en bancos y algunos lentejones que pasan a arenas de grano grueso en los sectores distales, intercalados en paquetes lutíticos rojos. Estos materiales afloran en los escarpes y tramos superiores e

intermedios de las vertientes que enlazan los niveles residuales con los fondos de valle actuales de la depresión.

La formación de glacis del cuaternario antiguo, que es ligeramente más torrencial, se caracteriza por la presencia de un horizonte de gravas cementado por carbonatos. Ejemplos de este tipo de formaciones son las ya mencionadas Planas de les Estoses, Corral Nou y Can Rosell.

En los tramos inferiores de estas vertientes afloran arcillas rojas, arenas y lutitas de origen marino peridéltico de edad miocena (IGME 1973). En estas vertientes aparecen diversos resaltes estructurales de conglomerados.

Por otra parte, también existen áreas donde se ha producido la acumulación de gravas y arenas de pizarras procedentes del zócalo paleozoico de la Sierra Prelitoral. Un ejemplo de estas formaciones es la mencionada Plana de Mas Marquet. Las vertientes asociadas a estas formaciones son de pendiente suave a moderada (5-10%), y están originadas por la incipiente incisión de la red de drenaje (Figura 2.11).

Estructuralmente, la unidad es un glacis sobre formación continental adosada a la Sierra Prelitoral, con una pendiente entre 1-10 %, desde el contacto con la sierra hacia el centro de la depresión.



Figura 2.11. Vista de la Plana de Mas Marquet, entre Piera y Hostalets de Pierola.

- *Red de drenaje.*

Parte de la red de drenaje de la unidad es no funcional, en fondos, que se encajan en las plataformas residuales según un patrón paralelo a la dirección de la pendiente. Estos fondos son de escasa amplitud y difícilmente se pueden cartografiar a escalas semidetalladas.

En las vertientes de estos niveles residuales, sobre las calcilutitas miocenas, se encajan una serie de barrancos de dimensiones variables en diferentes partes de la unidad de paisaje. Al sur del río Anoia y Riudevittles tienen menores dimensiones (entre 70-120 m de anchura y 25-30 m profundidad) que en la zona de Piera (entre 70-135 m anchura y 35-40 m de profundidad). Este hecho podría deberse a la menor cohesión de los materiales terciarios en la zona norte y al mayor desnivel con respecto al nivel de base de la depresión. La densidad de la red de drenaje varía entre valores moderadamente bajos a moderadamente altos (0.6-3.7 km⁻²).

- *Geoformas.*

Las formas típicas de la unidad de paisaje son relieves tabulares (plataformas), que ocupan posiciones topográficas elevadas con respecto a los cauces principales de la depresión (Figura 2.12). Estas plataformas son residuos del glacis del cuaternario antiguo, descrito anteriormente. Este glacis ha sido disectado de forma desigual dependiendo de varios factores: tamaño de las gravas, espesor del estrato de gravas y granulometría de los materiales detríticos. En la parte más distal a la sierra, el estrato de gravas se ha eliminado por el efecto de la erosión, habiéndose encajado una serie de fondos de escasa amplitud y divisorias convexas o residuos de plataforma de pequeño tamaño.

También se han considerado dentro de esta unidad los escarpes y vertientes asociadas a estas plataformas residuales. En general, estas vertientes son de forma rectilínea y cóncava, con pendientes moderadas a fuertes (5-15%). Se encuentran más disectadas por la red de drenaje en su parte inferior.

Por otra parte, el glacis asociado al zócalo paleozoico de la Sierra Prelitoral está menos afectado por la incisión de la red de drenaje, no habiéndose formado niveles residuales elevados. Las vertientes asociadas a estas formaciones son de pendiente suave a moderada (5-10%), y están originadas por la incipiente incisión de la red de drenaje. En su parte distal, esta unidad limita con profundos barrancos de paredes casi verticales.

La amplitud de relieve de la unidad de paisaje varía por término medio entre los 7 m de las plataformas poco disectadas a los 25 m de las vertientes moderadamente escarpadas o escarpadas.

Se han distinguido cuatro tipos de geoformas:

- B1: Plataformas residuales.
- B2: Glacis.
- B3: Vertientes.
- B4: Fondos.

B1. Plataformas residuales.

Originalmente son superficies planas o casi planas con pendiente longitudinal entre 1-5% que ocupan posiciones topográficas elevadas. Se han distinguido varias subunidades, en función del grado de disección.

Las formas menos disectadas (subunidad B11) suelen encontrarse en la zona proximal a la Sierra Prelitoral (Figura 2.12). Representan el nivel más elevado respecto a los ríos Riudeviltles y Anoia. La pendiente media de esta unidad es del 12%. Esta pendiente es alta para tratarse de una forma de relieve originalmente llana. Esto es consecuencia de la incipiente incisión de la red de drenaje, en forma de fondos. El relieve interno medio, 7 m, se corresponde con el bajo nivel de disección que presenta la unidad.

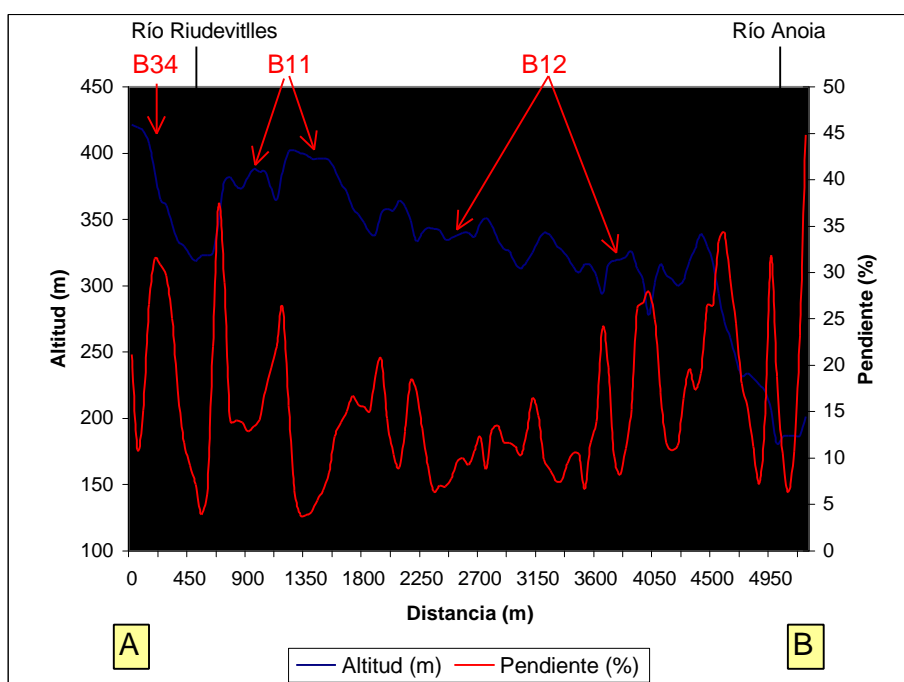


Figura 2.12. Perfil topográfico P-3.

La subunidad B12 representa plataformas residuales moderadamente disectadas. Presentan una mayor incisión de la red de drenaje, que se traduce en un mayor relieve interno (16 m por término medio) y una mayor densidad de drenaje (1.4 km km^{-2}). También la pendiente y su grado de variabilidad se ven incrementados, aumentando la frecuencia de la clase 10-15 %.

Las formas más disectadas (subunidad B13) suelen encontrarse en la parte distal a la sierra (Figura 2.13). La disección se produce en forma de fondos de escasa amplitud, quedando residuos de plataforma de pequeño tamaño y crestas. Esto hace que a escala semidetallada estas áreas se hayan de cartografiar como una asociación de formas. Todas las variables topográficas consideradas presentan los valores más altos de las unidades de plataforma (Tabla 2.7). Es significativo el aumento de la frecuencia de la clase de pendientes 15-20%, del relieve interno medio (23 m) y de la densidad de drenaje (2.6 km km^{-2}).

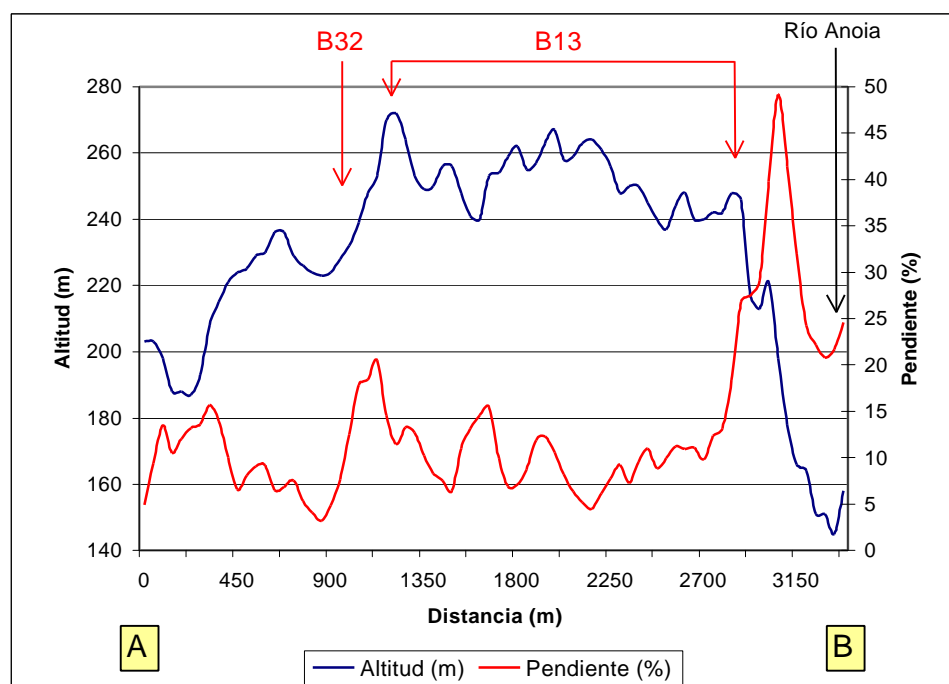


Figura 2.13. Perfil topográfico P-4.

A pesar del gran potencial topográfico erosivo de estas unidades, por su elevado desnivel con respecto al nivel de base, la incisión de la red de drenaje no es tan elevada como en otras unidades por el control que ejercen los conglomerados terciarios subyacentes, que en algunos casos presentan espesores de hasta 100 m.

Respecto a la adyacencia con otras unidades, las plataformas limitan básicamente con vertientes fuertemente inclinadas, moderadamente escarpadas o escarpadas, dado que en su mayoría constituyen niveles muy elevados. Esto hace que la tendencia de estas geoformas sea hacia la reducción de la superficie de divisoria plana por la evolución erosiva de sus bordes.

B2. Glacis.

Esta geoforma se caracteriza por presentar pendientes longitudinales suaves (3-8 %), pero moderadamente inclinadas en sentido transversal (5-15 %), lo que indica la incipiente incisión de la red de drenaje (Figura 2.14). Su origen está asociado a cauces no permanentes cuya cuenca no sobrepasa los límites de la Sierra Prelitoral (p.e. riera de Can Aguilera).

La amplitud del relieve de la unidad es baja (9 m), similar a la unidad de plataformas poco disectadas. No obstante, la densidad de drenaje es mayor (2.9 km km^{-2}), en forma de fondos y cárcavas, que se desarrollan en los materiales subyacentes incoherentes que forman la unidad.

Esta geoforma limita en una gran parte de su perímetro (39.9 %) con cárcavas, barrancos y badlands. Esto indica el alto riesgo de erosión que sufren estas áreas por el avance longitudinal y expansión lateral de estas formas de erosión, dado la incoherencia de los materiales.

B3.- Vertientes.

En esta unidad de paisaje existen vertientes de diferente tipo y grado de inclinación. Los niveles de plataformas residuales limitan en una ruptura de pendiente convexa con vertientes de pendiente moderadamente escarpada a escarpada (20-30%; subunidad B34, Figura 2.12 y Figura 2.15).

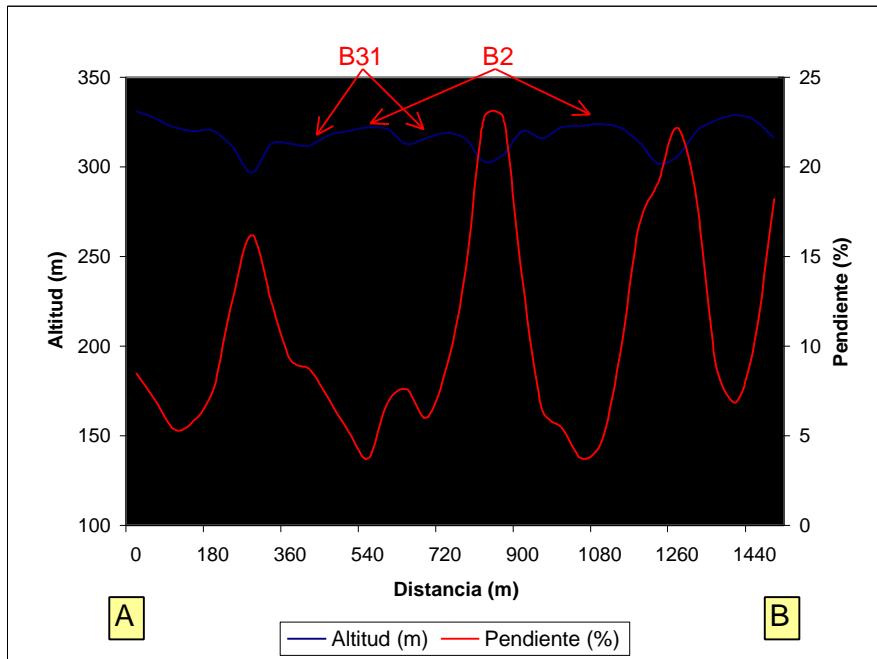


Figura 2.14. Perfil topográfico P-5.

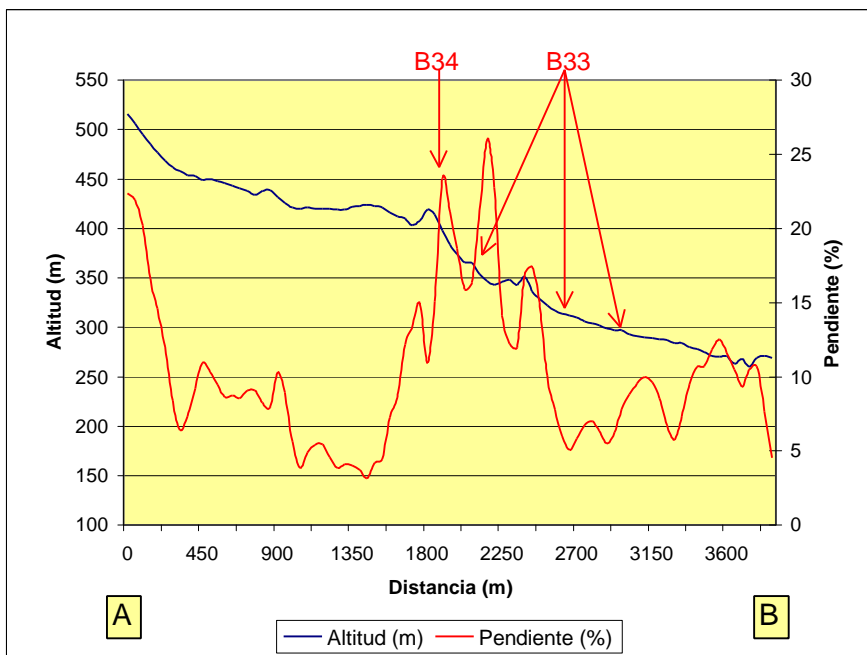


Figura 2.15. Perfil topográfico P-6.

Esta geoforma tiene la mayor pendiente media (23.7 %), relieve interno medio (25 m) y variabilidad de la pendiente de toda el área de estudio (a excepción del área de montaña); por lo que el potencial topográfico para la erosión hídrica puede considerarse como elevado. Sin embargo, el índice de adyacencia a barrancos muestra que no es una unidad típicamente disectada. Principalmente limita con unidades de plataforma residual y con vertientes complejas con menor grado de inclinación (subunidad B33).

De las vertientes de la subunidad B33 (Figura 2.15), las que conectan con el área de relieve suavemente ondulado (zona del Pla del Penedès) y las del valle del Riudeviltles, se caracterizan por la presencia de resaltes estructurales de conglomerados. La complejidad de las vertientes se traduce en una mayor variabilidad del grado de pendiente dentro de esta geoforma (mayor rugosidad). También ha favorecido un incremento de la densidad de drenaje (2.8 km km^{-2}) respecto a vertientes predominantemente rectilíneas con el mismo grado de pendiente y litología dentro de la misma unidad de paisaje (1.8 km km^{-2}). La amplitud de relieve es moderada (15 m). El índice de adyacencia a barrancos es alto (40.7 % del perímetro), al igual que ocurre con otras unidades de vertiente de la unidad de paisaje de pie de monte, donde básicamente afloran margas y margas arenosas. Esto revela un elevado riesgo de crecimiento y desarrollo de cárcavas en estas vertientes.

En la parte más distal de la unidad de pie de monte, los escarpes tienen unas dimensiones muy reducidas, (prácticamente no son cartografiables a escalas semidetalladas). Los niveles residuales de gravas parecen conectarse directamente a vertientes de pendiente moderada (5-15 %). Estas vertientes constituyen la subunidad B32, donde también se dan amplias crestas en pendiente (de dirección paralela a los cauces principales), con vertientes cóncavas que conectan con fondos. Esta alternancia de formas hace que el relieve interno medio sea relativamente alto (21 m), aunque en realidad lo que existe es una distribución bimodal con dos intervalos predominantes: 5-15 m y 25-30 m.

Otro tipo de vertientes de pendiente moderada se dan en la zona NW del área de estudio, en la conexión con el zócalo paleozoico de la sierra. También estas vertientes están abruptamente recortadas por los barrancos y badlands desarrollados en esta área.

Vertientes de pendiente suave a moderada (1-10%) se dan de forma característica asociadas a la subunidad B2. Son fruto de la incipiente incisión de la red de drenaje en esta geoforma (Figura 2.14, subunidad B31). En general, estas vertientes son de forma rectilínea o convexa. Tiene una densidad de drenaje moderadamente alta (3.7 km km^{-2}), un relieve interno moderado que presenta un valor bimodal similar al de la subunidad B32. El índice de adyacencia a barrancos es muy alto (52.8 % del perímetro), siendo estos muy activos, lo que hace a esta unidad muy susceptible de ser afectada por su expansión lateral.

2.3.3.3. *Unidad de paisaje de vertientes y barrancos*

- Situación.

Al norte del río Anoia y hasta los límites N y SE del área de estudio. Se caracteriza por la ausencia de relieves residuales y por el desarrollo de una densa y profunda red de barrancos. Los más importantes son la riera de Rierusa, riera de Masquefa, torrent de Can Carrot, torrent

del Llop y arroyo de Claramunt. Las poblaciones más importantes en esta área son Masquefa y Sant Llorenç d'Hortons.

- *Litología y estructura geológica.*

En la zona norte y centro (sector Piera - Masquefa - Sant Llorenç) afloran arcillas rojas, areniscas y conglomerados con matriz arcillosa o arenosa sin cementar (IGME 1975b). Estos materiales fueron depositados en un ambiente fluviotorrencial lagunar, por lo que su alternancia a lo largo de la unidad es elevada. La no existencia de materiales cementados resulta en una ausencia de relieves residuales o estructurales. Tan solo puntualmente se encuentran lentejones de conglomerados parcialmente cementados en su parte superior por carbonato cálcico.

En la zona sur de la unidad (al sur de Sant Llorenç d'Hortons) afloran materiales depositados en ambientes marinos: arcillas muy plásticas, arenas arcillosas y limolitas de color amarillento y areniscas de grano grueso (Casanovas *et al.* 1972, IGME 1975c). La estructura geológica es subhorizontal, con ligero buzamiento hacia la Sierra Prelitoral.

- *Red de drenaje.*

La red de drenaje es dendrítica, caracterizada por una densa y profunda red de cárcavas y barrancos excavados en las calcilutitas y areniscas incoherentes que rellenan la fosa. La superficie afectada por la incisión supone el 23.2 % del total de la unidad.

En algunos de estos barrancos se han desarrollado llanuras de inundación, de una amplitud máxima entre 230-320 m, que ocasionalmente se aprovechan para viñedos o huertos.

El crecimiento de la red de drenaje es muy activo, en forma de cárcavas, que crecen preferentemente asociadas a los puntos y canales de desagüe de las parcelas de viña. No se han cartografiado fondos. En general, las vertientes limitan de forma abrupta con los barrancos.

- *Geoformas.*

En esta unidad de paisaje las formas típicas son las vertientes, modeladas por la incisión de la red de drenaje en las calcilutitas y areniscas incoherentes. En general, estas vertientes tienen un carácter complejo. El perfil transversal es cóncavo-convexo, con numerosas ondulaciones muchas veces solamente apreciables a nivel de parcela. Por término medio la pendiente es del 15.9 % (fuertemente inclinada o colinada) (Figura 2.16).

Las vertientes suelen culminar en unas divisorias estrechas, redondeadas por la erosión, en las que no existen depósitos residuales, o bien estos son conglomerados terciarios sin cementar. En su parte inferior las vertientes limitan o están abruptamente recortadas por profundos barrancos, que evolucionan lateralmente mediante desprendimiento de bloques a favor de fisuras causadas por la infiltración del agua, movimientos de masa y por crecimiento de cárcavas a favor de los canales o vías de desagüe de las parcelas.

La amplitud del relieve en esta unidad varía por término medio entre 13-20 m (moderada a relativamente alta).



Figura 2.16. Relieve característico de la unidad de vertientes y barrancos. Destaca el carácter complejo de las vertientes y la disección del paisaje por la incisión de la red de drenaje.

Se han distinguido dos tipos de geoformas: divisorias y vertientes, agrupando esta última a diferentes tipos de vertientes.

C1. Divisorias.

Prácticamente no existen niveles residuales elevados que formen divisorias planas. Las divisorias son estrechas y redondeadas (Figura 2.17, Figura 2.18 y Figura 2.19). En muchos casos se corresponden con paleocanales que han perdido el nivel residual superior por la erosión, habiendo evolucionado a crestas redondeadas.

La pendiente media de la subunidad C1 es del 13 %, con una amplitud de relieve de 13 m, ya que se han incluido los segmentos convexos de la ruptura de pendiente. La densidad de drenaje es baja (0.8 km km^{-2}), habiéndose observado en campo la incipiente incisión de cárcavas en alguna de estas divisorias favorecidas por el cultivo de viña. Mayoritariamente limitan con vertientes complejas fuertemente onduladas o colinadas (48.2 % del perímetro).

C2. Vertientes.

El grado de disección de la unidad de paisaje es elevado, el cual viene indicado por una alta densidad de drenaje y una gran diferencia de altitud relativa respecto a los niveles de base

locales (entre 50 y 100 m). Esto hace que las vertientes de enlace entre las divisorias y los barrancos tengan, por lo general, una pendiente de moderada a fuerte (5-15%), superándose en numerosas zonas, distintas a paredes de barrancos, el límite del 20%.

El carácter de las pendientes es complejo, ofreciendo un aspecto de terreno ondulado, difícil de distinguirse en fotografías aéreas semidetalladas o incluso detalladas. Favorecen la concentración local del flujo del agua, siendo un factor determinante para el desarrollo de cárcavas.

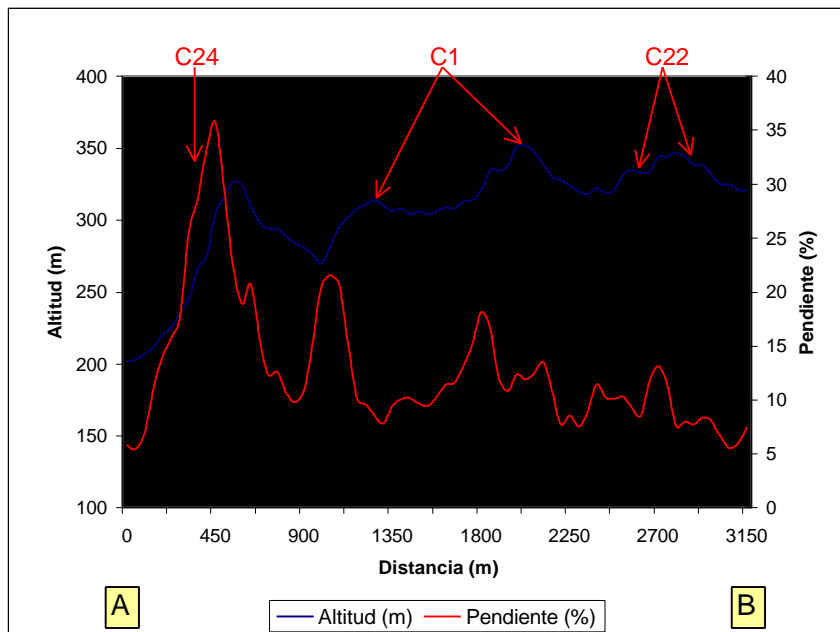


Figura 2.17. Perfil topográfico y de pendiente P-7.

Se han distinguido diversos tipos de vertientes según la pendiente general (grado de inclinación):

- C21: Vertientes complejas fuertemente inclinadas, de pendiente entre el 5-15%.
- C22: Vertientes complejas fuertemente inclinadas a colinadas, de pendiente 10-20%. (Figura 2.17 y Figura 2.18).
- C23: Vertientes colinadas, de pendiente 15-20%. (Figura 2.19).
- C24: Vertientes moderadamente escarpadas o escarpadas, de pendiente 20-30%. (Figura 2.17 y Figura 2.18).

Dentro de estas subunidades de vertiente no se han incluido las paredes de los barrancos. Tampoco se han encontrado fondos de tamaño cartografiable, considerándose incluidos en las unidades de vertiente. En general, las vertientes tienen una amplitud de relieve moderada o relativamente alta (15 m subunidad C21 y 20.5 m subunidad C24). La variabilidad de las pendientes es alta en todos los casos y presenta valores de rugosidad entre 19.6 y 36.5. La densidad de drenaje es moderada, entre 2.1 y 2.5 km²; siendo característico de las vertientes de la unidad de paisaje su alto grado de conexión a la red de cárcavas y barrancos. En este sentido las vertientes presentan índices de adyacencia a barrancos altos o muy altos (39.3 y 50.1 % del perímetro).

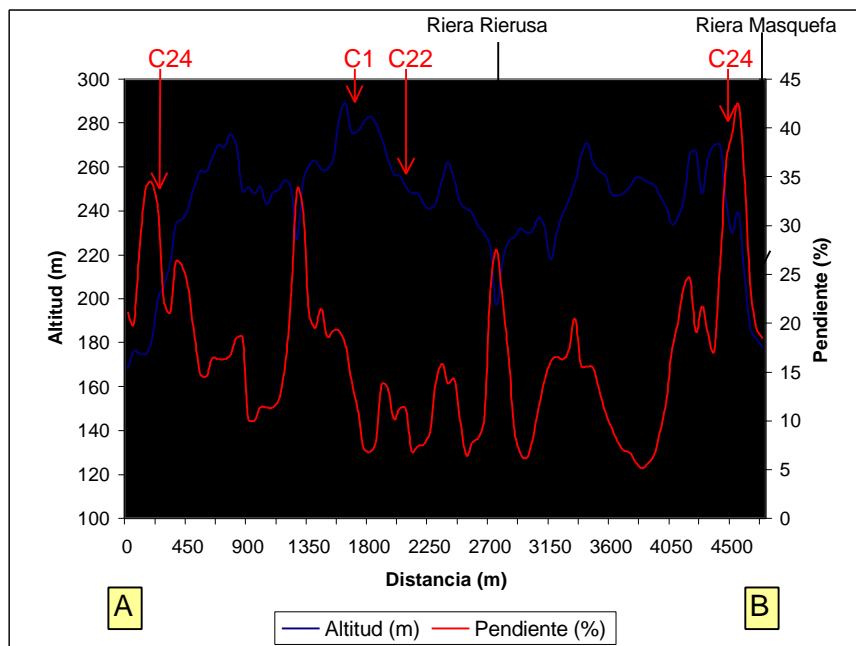


Figura 2.18. Perfil topográfico y de pendiente P-8.

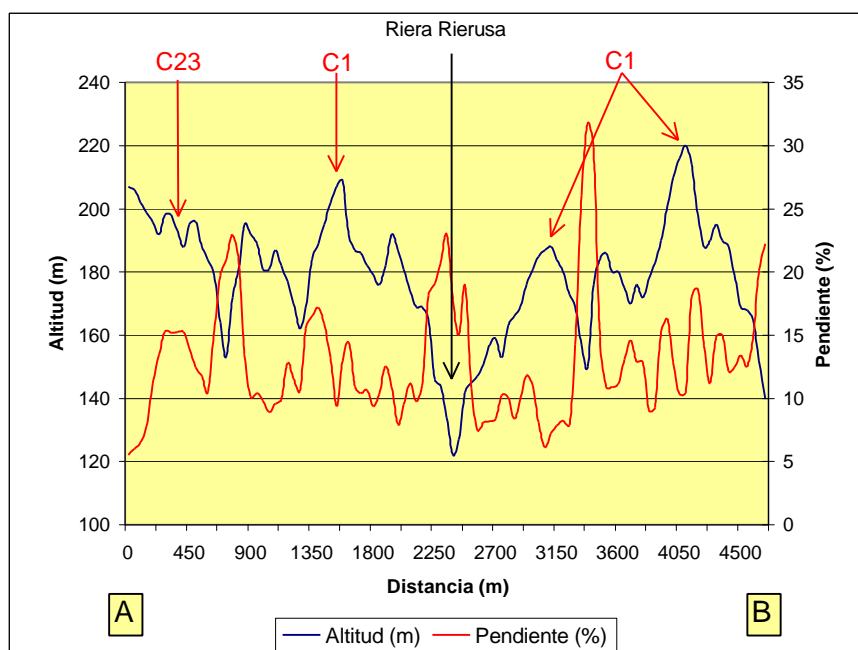


Figura 2.19. Perfil topográfico y de pendiente P-9.

2.3.3.4. Unidad de relieve suavemente ondulado (Pla del Penedès)

- Situación.

Area comprendida entre el pie de las vertientes de las plataformas residuales de la Plana de les Estoses y Carrer Can Rossell, y el límite sur del área de estudio: riera del Avernó y Pudról de la Granada.

- Litología y estructura geológica.

Predominio del cuaternario indiferenciado, que corresponde a suelos que enmascaran las series miocenas. En zonas más proximales a la vertiente de las plataformas residuales, y en los cauces excavados por la red de drenaje aflora una serie sedimentaria de facies perideltaica de edad miocena. Está definida por pasadas rojas, arcillosas y arenosas muy mal seleccionadas (IGME 1973). Estas cuñas y lentejones fueron depositados en un medio marino poco profundo al que ocasionalmente llegaban fuertes aportes continentales.

La estructura geológica es subhorizontal, con ligero buzamiento hacia la Sierra Prelitoral.

- Red de drenaje.

La mayor parte de la red de drenaje es funcional, compuesta por diversos arroyos paralelos, que cruzan la depresión de NW a SE en dirección perpendicular a la dirección de la falla del pie de la Sierra Litoral. Su densidad es variable: la distancia entre estos arroyos varía entre los 300 y 2000 m, habiendo mayor densidad en las proximidades del pie de las vertientes de las plataformas residuales de la zona del río Riudeviltles, donde el gradiente topográfico es mayor. Están encajados entre 15-25 m. En estos cauces se han formado pequeñas llanuras de inundación que tienen un uso agrícola de cierta demanda.

Otra parte de la red de drenaje es no funcional, en valles planos que se encajan en las formas residuales y en las vertientes. Es frecuente encontrar evidencias de erosión remontante en estos valles, como el crecimiento de cárcavas y barrancos a favor de ellos.

La densidad de drenaje varía entre valores muy bajos (0.1 km km^{-2} a valores moderados 1.8 km km^{-2}).

- Geoformas.

Esta unidad se caracteriza por la abundancia de llanuras suavemente onduladas en las que resaltan algunos niveles residuales de gravas (Figura 2.20).

La Figura 2.21, Figura 2.22 y Figura 2.23 muestran 3 perfiles topográficos y de pendiente correspondientes a 3 cortes transversales en diferentes partes de la unidad de paisaje. En estos perfiles se observa el predominio de las vertientes de pendiente suave a moderada (1-10%), relegándose las pendientes más elevadas a las zonas de incisión de la red de drenaje y al límite sur de la unidad (divisoria Foix-Romaní).

La amplitud de relieve varía por término medio entre 5-6 m en las divisorias a 19 m en las vertientes de mayor pendiente. La amplitud máxima se produce en el límite sur del área (divisoria Foix-Romaní).

Dentro de esta unidad se diferencian tres tipos de geoformas:

- D1: Asociación de divisorias y vertientes.
- D2: Vertientes.
- D3: Fondos de valle.



Figura 2.20. Morfología del paisaje característica de la unidad de relieve suavemente ondulados.

D1. Asociación de divisorias y vertientes.

Las áreas representadas por esta unidad menor coinciden litológicamente con los afloramientos miocenos de la serie sedimentaria de facies perideltaica, correspondientes a pasadas rojas arcillosas y arenosas mal seleccionadas (IGME 1973).

El encajamiento de la red de drenaje ha producido la erosión diferencial de los materiales, originando una serie de divisorias donde o bien permanecen residuos de conglomerados sin cementar, o bien hay bancos de arenas con diversos grados de cementación, que se han comportado como materiales más resistentes a la erosión (Figura 2.23). En algunos casos el nivel resistente ya no está presente, quedando una superficie alomada de forma convexa (pendiente 5-10%).

Las formas resultantes de esta erosión diferencial se han agrupado en una asociación de formas: divisorias redondeadas o planas, de escasa amplitud (<100 m), con límites difusos en

un cambio de pendiente convexo. Estas divisorias están colgadas unos 20-30 m respecto a los cauces locales del área. Las vertientes que las limitan son en general cóncavas, de longitudes entre 50 y 200 m, y de pendientes moderadas. Por término medio, esta geoforma tiene una pendiente de 7.8%.

El relieve interno medio es el más bajo de toda el área de estudio (6 m), con una baja densidad de drenaje (0.7 km km^{-2}). Esta unidad presenta su mayor índice de adyacencia con fondos que conectan con las vertientes asociadas a las divisorias (36.1 % del perímetro). También muestra un índice de adyacencia alto con los arroyos que drenan la zona sur del área de estudio (33.4 % del perímetro).

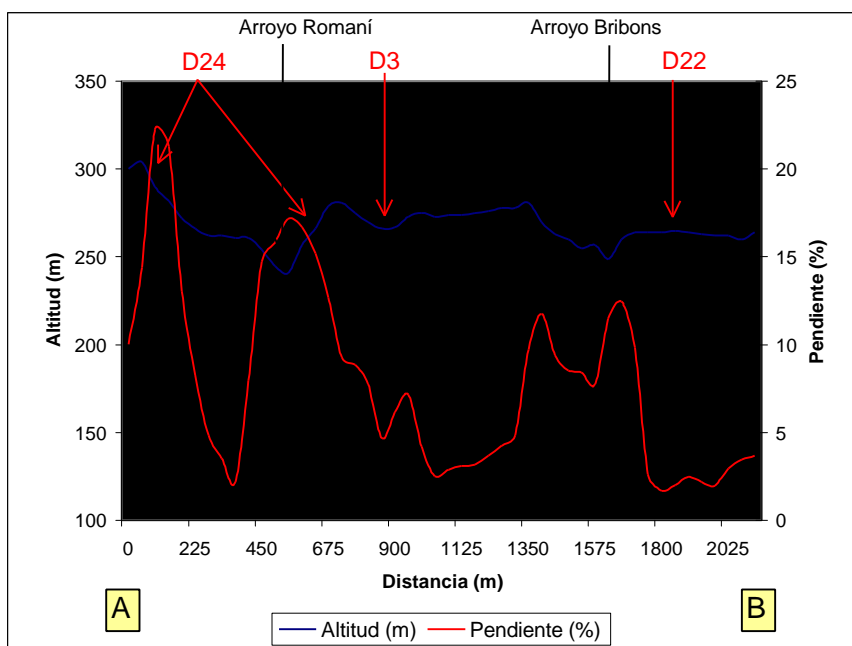


Figura 2.21. Perfil topográfico y de pendiente P-10.

D2. Vertientes.

Salvo el escarpe del nivel residual coincidente con la divisoria de las cuencas del río Foix y del Arroyo Romaní (zona del Pudrol de la Granada), con una pendiente entre el 20-45%; y algunas vertientes moderadamente escarpadas asociadas a la incisión de la red de drenaje, 10-20% de pendiente, el resto de las vertientes de la unidad de paisaje son suaves o moderadas (1-10%). Todas ellas presentan una variabilidad de la pendiente baja, excepto las vertientes escarpadas. Esto pone de manifiesto la mayor simplicidad de las vertientes de esta unidad de paisaje en relación a las del área de vertientes y barrancos.

En estas zonas escarpadas (subunidad D24) afloran materiales miocenos de fase perideltaica. La parte superior del escarpe de la divisoria Foix-Romaní está compuesta por detríticos terrígenos con gravas de origen aluvial de edad cuaternaria, que forman un horizonte petrocálcico en la parte superior.

El relieve interno de la subunidad varía entre 5 y 35 m, con valores medios de 10-15 m en sentido transversal a la dirección de la pendiente y 25-35 m en la dirección de la pendiente. La densidad de drenaje es moderada (1.7 km km^{-2}).

La subunidad D24 limita con unidades de vertiente moderada o fuertemente inclinadas (5-10%), donde también afloran calcilutitas (subunidad D23). Esta geoforma presenta una distribución bimodal en el relieve interno, con amplitudes entre 5-15 m en sentido transversal y hasta más de 50 m en la dirección de la pendiente. El nivel inferior conecta con la red de drenaje principal del área, lo que hace que tenga un índice de adyacencia alto a áreas consideradas como barrancos (36.7 % del perímetro).

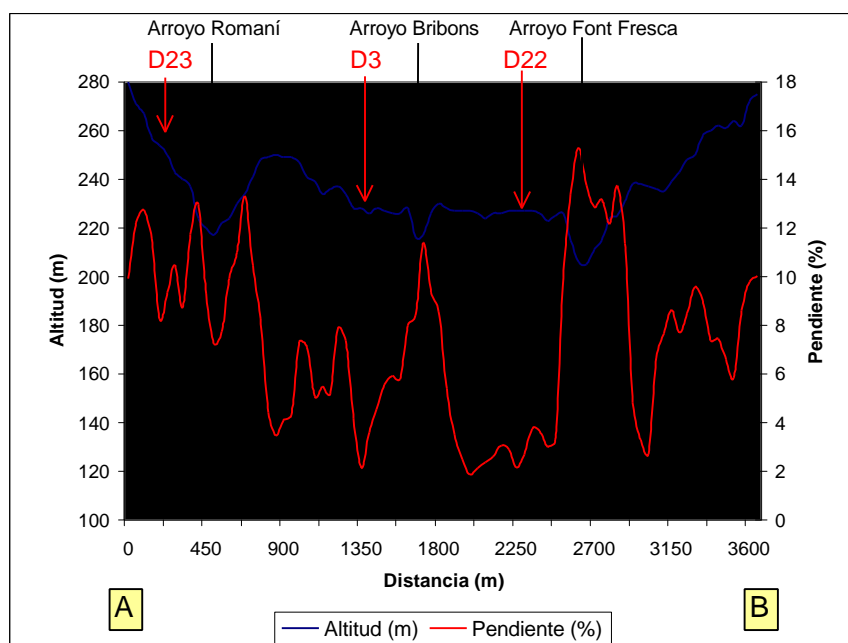


Figura 2.22. Perfil topográfico y de pendiente P-11.

Los materiales subyacentes son calcilutitas o detríticos terrígenos aluvio-coluviales. Estas vertientes no son regulares, tienen un relieve ligeramente ondulado, donde se alternan pequeños lomos con zonas más deprimidas donde se concentra la escorrentía.

El resto de las vertientes son de pendiente suave o moderada (1-10 %). Se han clasificado como vertientes en glaciares y llanuras aluviales (subunidad D22); y vertientes de enlace entre niveles residuales inferiores y fondos (subunidad D21). Las primeras se caracterizan por ser formas rectilíneas que constituyen un nivel residual intermedio entre las plataformas del nivel de la Plana de les Estoses y los cauces actuales. Estas son asociadas a la red de drenaje actual, constituyendo grandes extensiones (2-3 km de longitud y 0.5-1 km de amplitud). Los materiales subyacentes son gravas calizas, generalmente no cementadas, que se alternan con materiales aluviales más finos. A una escala más detallada se aprecia el incipiente encajamiento de fondos de valle planos y circulares. Esto se pone de manifiesto en los valores medidos del relieve interno, con una distribución bimodal según dirección paralela a la red de drenaje (5-10 m) o dirección perpendicular (15-25 m). El índice de adyacencia a áreas consideradas como barrancos es muy alto (57.8 % del perímetro), ya que esta subunidad se

caracteriza por el encajamiento de la red de drenaje producido por un descenso del nivel de base general, producido posiblemente como consecuencia de la regresión marina a finales del Mioceno.

La subunidad D21, de escasa extensión, presenta las pendientes más suaves del área de estudio (1-5 %), con un bajo relieve interno medio (8 m), una rugosidad baja y una densidad de drenaje de 0.1 km km^{-2}). Representa una vertiente de enlace entre niveles residuales inferiores y fondos.

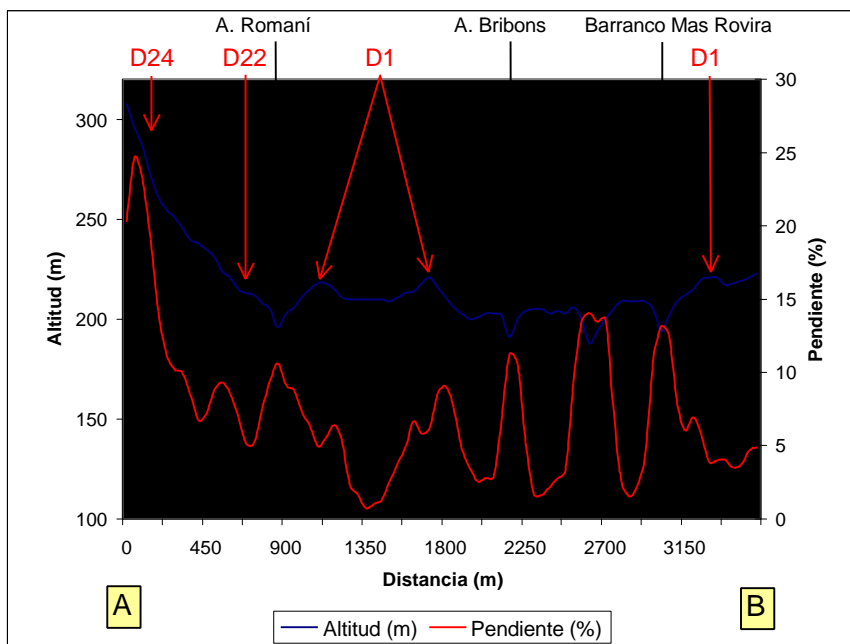


Figura 2.23. Perfil topográfico y de pendiente P-12.

D3. Fondos.

Están formados por valles planos de amplitudes entre 50-200 m y longitudes de hasta 4-5 km. Se encajan en las vertientes y niveles residuales. Presenta una pendiente media del 7.3 %, con pendientes longitudinales entre el 1-5 % y transversales entre el 5-15 %. En esta última dirección se presenta la mayor amplitud de relieve, 5-10 m, ya que se han incluido los segmentos inferiores de vertiente de las laderas cóncavas colindantes.

Actualmente, en algunos de estos fondos se ha observado el crecimiento de cárcavas, que avanzan desde la salida de los fondos a los barrancos que drenan el área.

2.3.3.5. Unidad de paisaje de niveles aluviales recientes

- Situación.

Esta unidad la constituyen los niveles aluviales asociados a los cauces principales que discurren por el área de estudio: río Anoia, río Riudeviltles, riera de Can Aguilera, riera de Masquefa, riera de Rierusa y arroyo de l' Avernó.

- Litología y estructura geológica.

Materiales detríticos finos y gruesos de origen aluvial, de distinto origen según el área fuente: pizarras o rocas calizas. Estas formas están ligeramente buzadas hacia la Sierra Prelitoral, área origen de los cauces que drenan la Depresión del Penedès (excepto el Anoia que la atraviesa).

- Red de drenaje.

La densidad de drenaje de esta unidad varía entre 0.8 y 5.3 km km⁻². Esta última cifra es alta y no se corresponde en este caso con una alta disección de la unidad, ya que para el cálculo se han incluido las líneas de drenaje de los afluentes a la red principal que atraviesan la unidad hasta conectar con los cauces. Sí es destacable la disección de algunas terrazas, particularmente del Anoia y Riudeviltles, por barrancos desarrollados a favor del potencial topográfico entre el nivel de los cauces actuales y el nivel de las terrazas del nivel 1°.

- Geoformas.

El relieve de la unidad es el de un valle aluvial con diferentes niveles de terraza, aunque modificado por la disección causada por el crecimiento de cárcavas y barrancos. También, los diferentes niveles de terraza suelen estar conectados por glacis formados por materiales coluviales, siendo a veces difícil su distinción (Figura 2.24).

Gallart (1980) distinguió 5 niveles aluviales en el valle del Anoia, siendo el nivel más antiguo (5°) el correspondiente al glacis que yace sobre los denominados *conglomerados del Riudeviltles* y que se ha incluido en la unidad de pie de monte. Los niveles 3° y 4° no representan superficies cartografiadas a escala semidetallada. Están a alturas relativas de entre 65-90 m sobre el cauce del Anoia y se encuentran incluidos en las vertientes escarpadas de enlace entre el 5° y el 2° nivel.

El 2° nivel está bien conservado y forma amplios glacis, colgados unos 50 m sobre el Anoia. El 1^{er} nivel está formado por glacis y terrazas muy bien conservados, con una altura relativa de 30 m. El nivel más bajo lo constituye la actual llanura aluvial del Anoia, originada por la tendencia del río a describir meandros.

Dado que en esta unidad de paisaje se han tenido que considerar asociaciones de formas, a veces a distinto nivel e incluso incluyendo los glacis de enlace, la interpretación de los valores medios de amplitud de relieve, pendientes y variabilidad espacial de la pendiente pueden llevar a una imagen errónea de estas unidades.



Figura 2.24. Vista del valle del río Anoia desde la Sierra del Bardoch. Se distingue claramente la llanura aluvial. Más difícil resulta la distinción de los diferentes niveles de terraza, que están conectados por vertientes de enlace formadas por materiales de origen coluvial.

Se han distinguido los siguientes tipos de geoformas:

- E1: Llanuras aluviales.
- E2: Asociación de llanuras aluviales y terrazas.
- E3: Terrazas y asociación de terrazas y glacis.

E1. Llanuras aluviales.

Esta subunidad incluye las llanuras aluviales de los ríos y rieras (Figura 2.25, Figura 2.26 y Figura 2.27), en las que el carácter meandriforme ha originado llanuras de una cierta anchura (alrededor de 400 m en el Riudeviltles y entre 500 y 1100 m en el Anoia).

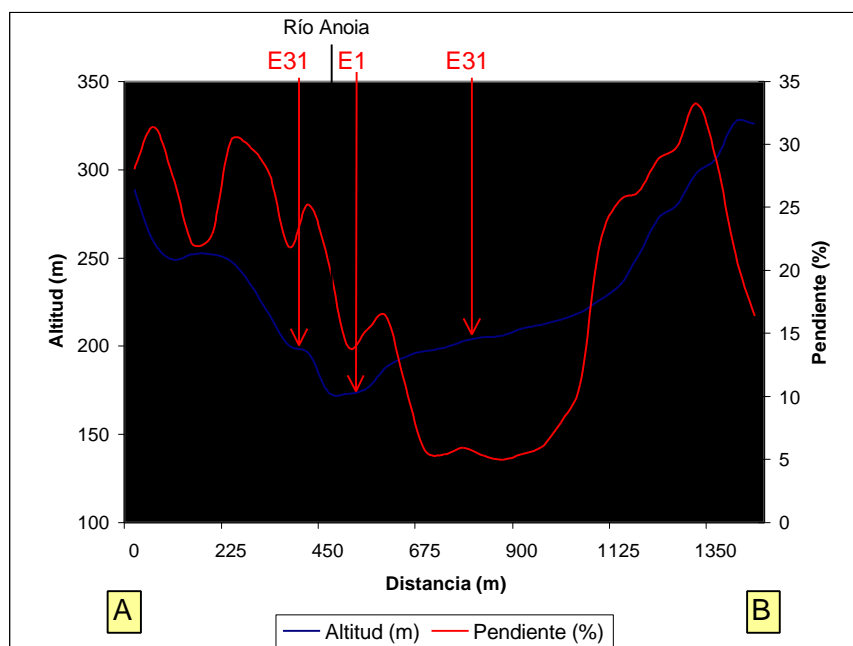


Figura 2.25. Perfil topográfico y de pendiente P-13.

El intervalo de pendientes más frecuente es entre 1-10 %, ya que quedan incluidos algunos glacis de enlace con terrazas de nivel superior. La clase de pendiente mayoritaria en dirección paralela a la red de drenaje es del 1-5%.

E2. Asociación de llanuras aluviales y terrazas.

En esta subunidad se incluyen la llanura aluvial y las terrazas inferiores degradadas de la riera de Can Aguilera (Figura 2.27). Estas terrazas tan solo tienen un desnivel de unos 15 m sobre la riera y están conectadas por un glacis, formado por materiales coluviales, con la llanura aluvial. La clase de pendiente mayoritaria es del 5-10 %, con incremento en los glacis de enlace hasta el 10-20 %.

E3. Terrazas y asociación de terrazas y glacis.

Se incluyen los niveles de terrazas 1º (subunidad E31) y 2º (subunidad E32) descritos anteriormente. Estos niveles se han observado principalmente en los valles del Anoia y Riudevittles. Ambos niveles son cartografiables por separado a escala semidetallada. También se han considerado dentro del grupo E3 los glacis de enlace (subunidad E33), cuya pendiente es del 5-15 %.

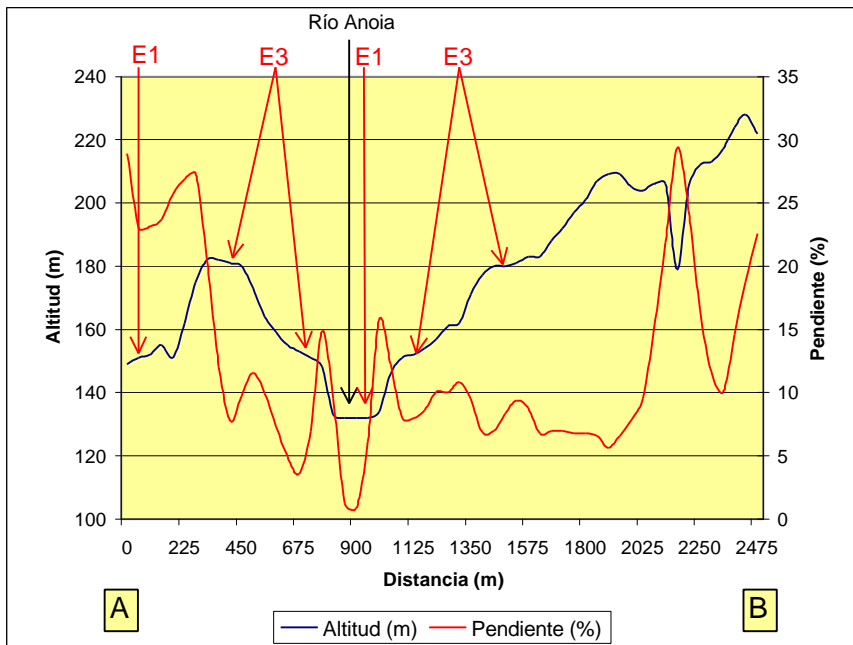


Figura 2.26. Perfil topográfico y de pendiente P-14.

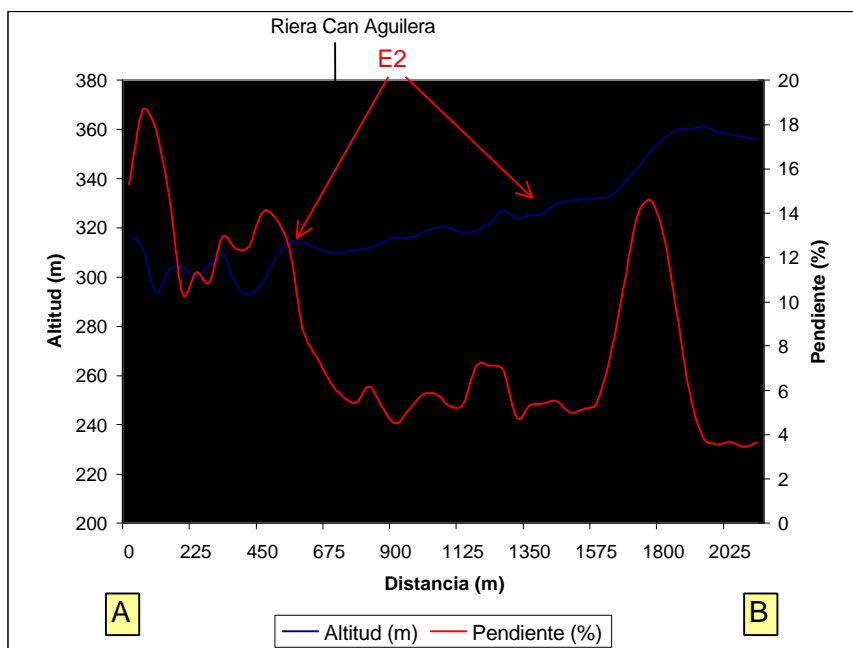


Figura 2.27. Perfil topográfico y de pendiente P-15.

2.4. Conclusiones

La presente investigación sobre el análisis de las geoformas del Alt Penedès – Anoia pone de manifiesto diversos hechos importantes que condicionan los procesos superficiales de desarrollo de los suelos y de la erosión:

- El paisaje del área de estudio es de tipo denudacional, con predominio de geoformas relacionadas con la erosión y la incisión de la red de drenaje en los materiales neógenos y cuaternarios que rellenan la Depresión del Penedès.
- La distribución y dinámica de las unidades estructurales, así como los diferentes patrones observados de denudación e incisión de la red de drenaje, están relacionados con los movimientos tectónicos producidos desde el Oligoceno, que son los que han condicionado la sedimentación detrítica continental en la Depresión del Penedès.
- La regresión marina producida a finales del Mioceno se apunta como la causa del descenso abrupto del nivel de base local, que marca el principio de la incisión de la red de drenaje en los materiales incoherentes que rellenan la depresión.
- La mayor incisión de la red de drenaje observada en la zona al norte del río Anoia se explica por la mayor altitud relativa del labio levantado de la falla Capellades-Vallcarca con respecto al nivel de base local y por la mayor incoherencia de los materiales que rellenan esta parte de la fosa tectónica. Esta mayor incisión ha producido un modelado del paisaje que ha dado lugar a vertientes complejas y barrancos, que conforman actualmente el relieve característico de esta región.
- Todas las formas topográficamente más estables, como las plataformas residuales, superficies llanas de pie de monte al norte del Anoia, terrazas de la unidad de niveles aluviales recientes, glacis y antiguas llanuras aluviales de la unidad de relieve suavemente ondulado y fondos de esta última unidad de paisaje, presentan incisión de cárcavas y barrancos. Este hecho pone de manifiesto la dinámica actual del paisaje, tendente al encajamiento de la red de drenaje y a la denudación de los suelos. Este encajamiento es mayor en el área al norte del Anoia y en las vertientes de unidades de plataformas residuales, donde la altitud relativa con respecto al nivel de base local es mayor.
- Las geoformas del área de vertientes y barrancos, las vertientes de las plataformas residuales y las superficies llanas del pie de monte al norte del Anoia tienen en común valores elevados del índice de adyacencia o vecindad a barrancos y badlands: entre el 30-53% del perímetro de dichas geoformas es compartido con barrancos y badlands. Esto implica un mayor potencial para la erosión por el retroceso de las paredes de los barrancos en dichas unidades respecto a otras del área de estudio. El desarrollo de los barrancos se verá más limitado en el área de pie de monte al sur del Anoia por el control estructural que ejercen los conglomerados neógenos que rellenan esta parte de la depresión.
- Actualmente, el hecho que parece determinar la aceleración de los procesos erosivos en el área de estudio es el sistema de usos de la tierra. El cultivo predominante de viñedos

con escasas y/o poco eficientes medidas de conservación de suelos y medidas de manejo del agua de escorrentía, favorece la escorrentía superficial, que produce erosión laminar y por arroyaderos. La concentración de la escorrentía se ve favorecida por la complejidad de las vertientes, con alternancia de formas convexas y cóncavas con pendientes de moderadas a fuertemente inclinadas, lo cual influye en el desarrollo de cárcavas y barrancos. Estos problemas se ponen especialmente de manifiesto en el área de vertientes y barrancos que, en general, es la que presenta mayores valores en los índices descriptivos relativos al potencial topográfico y del paisaje para la erosión (grado de pendiente, densidad de drenaje, relieve interno e índice de adyacencia a barrancos).

Sobre la metodología utilizada para el análisis morfométrico y morfográfico de las geoformas se puede concluir:

- El análisis de las geoformas del área de estudio se ha realizado a una escala semidetallada, útil para un análisis de caracterización a nivel regional. A este nivel algunas de las geoformas consideradas son asociaciones de formas del terreno más elementales que se pueden distinguir a una escala más detallada. El sistema jerárquico de clasificación de geoformas utilizada ha permitido representar la complejidad del terreno a escala semidetallada como asociaciones de geoformas más elementales.
- La utilización de una metodología basada en el uso de sistemas de información geográfica ha permitido automatizar la obtención de las variables topográficas e hidrográficas implicadas en el análisis. La interpretación de los datos obtenidos, sin embargo, debe hacerse por métodos empíricos y deductivos, dependientes del conocimiento del intérprete principalmente sobre geología del área de estudio y génesis y dinámica del paisaje. El proceso metodológico adoptado mediante el uso de sistemas de información geográfica es extrapolable, no obstante, a otras áreas de estudio.

2.5. Referencias bibliográficas

Agbu, P.A., Ojanuga, A.G. y Olson, K.R., 1989, Soil – landscape relationships in the Sokoto – Rima basin, Nigeria. *Soil Science*, 148: 132-139.

Cabrera, L., 1981, Influencia de la tectónica en la sedimentación continental de la cuenca del Vallès – Penedès (provincia de Barcelona, España), durante el Mioceno inferior. *Acta Geológica Hispánica*, 16: 165-171.

Casanovas, M.L., Calzada, S. y Santafe, J.V., 1972, Contribución al estudio del Mioceno del Penedès (sector Gelida). *Acta Geológica Hispánica*, 7: 143-148.

Dikau, R., 1989, The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology. In: *Three dimensional applications in GIS*, J. Rapper (editor), Taylor & Francis, London, pp 51-77.

Felicísimo, A.M., 1994, *Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales*. Pentalfa Ediciones. Oviedo.

Foch, R., 1986, *Història natural dels Països Catalans*. Fundació Enciclopedia Catalana. Barcelona.

Gallart, F., 1980, *Estudi geomorfològic del Penedès, sector Anoia i Riedevitlles*. Tesis doctoral, Universidad de Barcelona.

Gallart, F., 1981, Neógeno superior y Cuaternario del Penedès (Catalunya, España). *Acta Geológica Hispánica*, 16: 151-157.

Gaucher, G., 1981, *Les facteurs de la Pédogénèse*. G. Lelotte, Dison, 730 pp.

Gerrard, A.J., 1981, The catena concept. In: *Soils and landforms. An integration of geomorphology and pedology*, G. Allen and Unwin (editores), pp 61-82.

Gregory, K.J. y Gardiner, V., 1975, Drainage density and climate. *Z. Geomorph. N.F.*, 19: 287-298.

Hernández, G., 1991, Métodos morfométricos en la identificación de áreas críticas en procesos erosivos. In: *Memoria del Taller de Erosion de Suelos*, 22-24 Julio 1991. Universidad Nacional de Heredia, Costa Rica.

Horton, R.E., 1945, Erosional developments of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56: 275-370.

IGME, 1973, *Mapa Geológico de España, E. 1:50000, Vilafranca del Panadés. Hoja 419 (35-16)*. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria. Madrid.

IGME, 1975a, *Mapa Geológico de España, E. 1:50000, Igualada. Hoja 391*. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria. Madrid.

IGME, 1975b, *Mapa Geológico de España, E. 1:50000, Sabadell. Hoja 392*. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria. Madrid.

IGME, 1975c, *Mapa Geológico de España, E. 1:50000, Hospitalet de Llobregat. Hoja 420*. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria. Madrid.

Kreznor, W.R., Olson, K.R., Banwart, W.L. y Johnson, D.L., 1989, Soil, landscape, and erosion relationships in a Northwest Illinois watershed. *Soil Science Society America Journal*, 53: 1763-1771.

Martínez-Casasnovas, J.A., 1992, Mapa detallado de suelos de "Les Baixes Garrigues". III *Curso de Clasificación, Cartografía y Evaluación de Suelos*. Documentación del curso (difusión restringida), DMCS, Lleida.

Meijerink, A.M.J., 1988, Data acquisition and data capture through terrain mapping units. *ITC Journal* 1988-1: 23-44.

Millington, A.C., 1986, Reconnaissance scale soil erosion mapping using a simple GIS in the humid tropics. In: *Land evaluation for land-use planning and conservation in sloping areas*, W. Siderious (editor). ILRI publication num. 40. Wageningen, chapter 5, pp. 64-81.

Mitasova, H., Hofierka, J., Zlocha, M. y Iverson, L.R., 1996, Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *International Journal of Geographical Information Systems*, 10: 629-641.

Moore, I.D. Burch, G.J. y Mackenzie, D.H., 1988, Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of ephemeral gullies. *Transactions of the ASAE*, 31: 1098-1107.

Moore, I.D., Grayson, R.B. y Landson, A.R., 1991, Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, 5: 3-30.

Morgan, R.P.C., 1973, The influence of scale in climatic geomorphology: A case study of drainage density in West Malaysia. *Geografiska Annaler*, 55 A: 107-115.

Nizeyimana, E. y Bicki, T., 1992, Soil and soil – landscape relationships in the north central region of Rwanda, East-Central Africa. *Soil Science*, 153: 225-236.

Porta, J., Ramos, M.C. y Boixadera, J., 1994, Mechanical measures for runoff management and erosion control in the vineyards of North East Spain. In *Conserving soil resources: European perspective*, R.J. Rickson (editor), CAB International, Wallingford, pp. 369-378.

Roca, J., Boixadera, J. y Herrero, C., 1990, Relaciones geomorfología – suelos en el Pla d'Urgell. *I Reunión Nacional de Geomorfología*, pp 709-719.

Sheng, T.C., 1990, *Watershed management field manual*. FAO Conservation Guide 13/6. FAO, Roma.

Soil Conservation Service, 1981, *Soil Survey Manual, 430-V. Issue 1*. Soil Conservation Service - U.S. Department of Agriculture. Washington, D.C.

Stocking, M.A., 1972, Relief analysis and soil erosion in Thodesia using multi-variate techniques. *Z. Geomorph. N.F.*, 16: 432-443.

Stolt, M.H., Baker, J.C. y Simpson, T.W., 1993a, Soil – landscape relationships in Virginia: I. Soil variability and parent material uniformity. *Soil Science Society America Journal*, 57: 414-421.

- Stolt, M.H., Baker, J.C. y Simpson, T.W.**, 1993b. Soil – landscape relationships in Virginia: II. Reconstruction analysis and soil genesis. *Soil Science Society America Journal*, 57: 422-428.
- Swanson, D.K.**, 1990a, Soil landform units for soil survey. *Soil Survey Horizons*, 31: 17-21.
- Valenzuela, C.R.**, 1988, Soils geography. *ITC Journal* 1988-1: 45-50.
- Van Ghelue, P. y Molle, M. van**, 1990, Geomorphological mapping in the delineation of erosion risk zones in the Río Guadalhorce catchment (Spain). *Soil Technology*, 3: 327-342.
- Wambeke, A. van y Forbes, T.** (editores), 1985, *Guidelines for using Soil Taxonomy in the names of Soil Map Units*. SMSS Tech Monograph num. 10.
- Walker, P.H.**, 1989, Contributions to the understanding of soil and landscape relationships. *Australian Journal of Soil Research*, 27: 589-605.
- Williams, A.R. y Morgan, R.P.C.**, 1976, Geomorphological mapping applied to erosion evaluation. *Journal of Soil and Water Conservation*. 31: 164-168.
- Zevenbergen, L.W. y Thorne, C.R.**, 1987, Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12: 47-56.
- Zinck, J.A.**, 1988, *Physiography and Soils. Soil Survey Courses*. Subject matter K6. ITC Lecture Notes SOL-41.
- Zinck, J.A. y Valenzuela, C.R.**, 1990, Soil geographic database: structure and application examples. *ITC Journal* 1190-3: 270-294.

3. Suelos del Alt Penedès – Anoia: Análisis de las relaciones suelo-paisaje y Sistema de Información de Suelos (SIS)

3.1. Introducción

Las actuaciones sobre el territorio, particularmente en áreas agrícolas, pueden tener repercusiones tanto económicas como medioambientales sobre los recursos naturales. Las decisiones sobre dichas actuaciones requieren información, en concreto información sobre los suelos que forman dicho territorio y su comportamiento frente a las actuaciones sobre ellos (Porta *et al.* 1994). La no consideración de esta información puede desencadenar, entre otros, procesos de erosión, el deterioro de las propiedades físicas o la disminución de la fertilidad y, a medio o largo plazo, conducir a la degradación del terreno.

La información de suelos se ha venido tradicionalmente plasmando en mapas de suelos y, en la actualidad, en los denominados sistemas de información de suelos (SIS) (Boixadera y Porta 1991, Burrough 1991, Burrough 1993, Fernández y Rusinkiewicz 1993, Porta *et al.* 1994, Boixadera e Ibañez 1996, Frigolé 1997). Estos sistemas aprovechan las utilidades de un sistema de información geográfica (SIG), permiten un rápido acceso a la información y más eficientes capacidades de análisis integrado de esta información. El impacto de estas nuevas tecnologías ha favorecido el cambio de enfoques más descriptivos a enfoques de análisis más cuantitativos, ya que se permite el manejo y análisis de la gran cantidad de datos descriptivos y analíticos que genera cualquier prospección de suelos, pudiendo también llevar a cabo análisis de tipo espacial.

Tradicionalmente, el enfoque en cartografía de suelos ha sido estudiar la variación de los suelos en el paisaje como resultado de la acción de los factores y procesos formadores. Son numerosos los trabajos realizados por diversos autores (Valenzuela 1988, Agbu *et al.* 1989, Boixadera *et al.* 1989, Kreznor *et al.* 1989, Walker 1989, Roca *et al.* 1990, Swanson 1990, Zinck y Valenzuela 1990, Martínez-Casasnovas 1992, Nizyumana y Bick 1992, Stolt *et al.* 1993a, Stolt *et al.* 1993b). El estudio de la relación entre los suelos y el paisaje produce como resultado el denominado modelo de suelo-paisaje, que servirá para predecir propiedades de los suelos a partir de características observables en la superficie del terreno, establecer los límites de las unidades de suelos y su composición y proporcionar información de cara al uso y manejo del suelo (Zinck y Valenzuela 1990, Hewitt 1994, Porta *et al.* 1994).

Uno de los principales problemas, reconocidos en muchas cartografías de suelos basadas en la modelización de las relaciones suelo-paisaje, es la falta de explicación del modelo que el cartógrafo de suelos suele elaborar en su mente a partir del razonamiento empírico, basado en las observaciones de campo, y del razonamiento deductivo a partir de los conocimientos sobre la génesis del paisaje y de los suelos (Hewitt 1994). Esto hace que los modelos no sean reproducibles por alguien diferente al cartógrafo de suelos, y que no se puedan establecer conexiones entre los diferentes modelos de suelo-paisaje que son reconocidos en un área a diferentes niveles de detalle.

Otro de los aspectos relativos al estudio de las relaciones suelo-paisaje y su aplicación en los actuales sistemas de información de suelos es la organización de la información. La aparición de las bases de datos digitales y los SIG ha supuesto una revolución respecto a la cartografía convencional, pero impone nuevos condicionantes en cuanto a la organización de la información en una base de datos espacial. En este sentido, las relaciones suelo-paisaje también han sido reconocidas como un concepto fundamental en el diseño de la

estructura lógica de las bases de datos de suelos (Valenzuela 1988, Zinck y Valenzuela 1990, Fernández y Rusinkiewicz 1993).

En el Alt Penedès – Anoia, diversos estudios previos a la presente investigación han puesto de manifiesto la necesidad de disponer de información de suelos (Boixadera *et al.* 1990, Boixadera y Porta 1995, Poch y Porta 1995, Poch *et al.* 1996). Por una parte, la ocurrencia de intensos procesos de erosión hídrica en el área de estudio condiciona la sostenibilidad de las formas de cultivo actual del uso agrícola predominante: la viña. Ello exige información de suelos a escala detallada o semidetallada para priorizar las áreas de actuación ante la pérdida progresiva del recurso suelo. Por otra parte, la toma de decisiones que implica la implementación de medidas de conservación de suelos y aguas a nivel de parcela, o la gran transformación de las parcelas (movimientos de tierra y nivelaciones) que conllevan las nuevas plantaciones de viña, exige información de suelos a nivel detallado o muy detallado. Esta información, a diferentes escalas, vería incrementada su utilidad en un SIS, que permita al usuario o gestor de la información un rápido acceso, análisis y posibilidad de actualización.

Hasta el momento presente, la información de suelos existente, referente al Alt Penedès – Anoia, está recogida en varios estudios a nivel de parcela o de finca (Boixadera 1983, Porta *et al.* 1989, López 1994, Cervera 1994). Esta información constituye un valioso referente sobre algunos de los tipos de suelos predominantes en el área de estudio y sobre las prácticas de cultivo, manejo de los suelos y de conservación para un uso sostenible. Sin embargo, está a una escala muy detallada para poder ser usada en estudios de planificación a nivel regional y, desde el punto de vista de la superficie cartografiada, solamente cubre una pequeña parte del territorio.

Dada la importancia de la necesidad de la información de suelos en el Alt Penedès – Anoia, el presente trabajo de investigación tiene como objeto el análisis de las relaciones suelo-paisaje a escala regional, como metodología que ha de conducir a la cartografía a escala semidetallada (1:50.000) y a la caracterización de los procesos formadores y propiedades de los suelos del área de estudio.

La investigación se aborda a partir del establecimiento del modelo de suelo-paisaje en diferentes áreas modelo. Este modelo proporciona un conocimiento del patrón de distribución de los suelos en las unidades de relieve consideradas (geoformas), identificando las relaciones entre suelos, materiales originarios, pendiente, posición en la geoforma y procesos erosivos. El modelo de suelo-paisaje se aplica posteriormente, por medio de la cartografía de geoformas, con el objeto de plasmar la distribución espacial de las clases de suelos identificadas en todo el área de estudio.

El modelo de las relaciones suelo-paisaje es también usado como base lógica para el diseño del modelo conceptual de la base de datos espacial de suelos del área de estudio, que constituye el precursor del sistema de información de suelos. Este sistema ha de permitir disponer de una información de suelos a escala semidetallada de toda el área de estudio, almacenada de forma estructurada y eficiente, que podrá ser utilizada tanto en el análisis de procesos formadores como en el análisis relativo a la planificación de los usos actuales o futuros a nivel regional.

El hecho de utilizar sistemas de clasificación jerárquicos, tanto en la delimitación y clasificación de las geoformas como en la clasificación de los suelos (SSS 1975, Zinck 1988, SSS 1994), permitirá que el modelo de suelo-paisaje establecido a nivel semidetallado pueda generalizarse para obtener cartografías a nivel más generalizado, o pueda especializarse para apoyar cartografías a nivel más detallado.

3.2. Materiales y métodos

El proceso metodológico general llevado a cabo para el establecimiento del modelo de suelo-paisaje, diseño e implementación del sistema de información de suelos con información cartográfica a nivel semidetallado, y el análisis de los procesos formadores de los suelos del área de estudio se esquematiza en la Figura 3.1.

3.2.1. Establecimiento del modelo de suelo-paisaje

El modelo de suelo-paisaje considerado en la presente investigación es un modelo empírico-deductivo, basado en el análisis de las geoformas, observaciones de campo y razonamiento deductivo a partir de antecedentes sobre procesos de génesis del paisaje y de suelos.

La metodología para su definición fue:

- a) Análisis y delimitación de geoformas, realizado en base a los factores de orden geomorfológico considerados en la distinción de estas unidades de relieve (capítulo 2): litología de los materiales originarios, área fuente de los materiales, granulometría, procesos erosivos y/o deposicionales que intervienen o han intervenido en el modelado de las formas, y organización del drenaje. Se utilizaron fotografías aéreas de escala aproximada 1:30.000, adquiridas por el Instituto Geográfico Nacional e Institut Cartogràfic de Catalunya en los años 1984 y 1986.
- b) Establecimiento de áreas modelo donde analizar las relaciones suelo-paisaje en base a características fotointerpretativas relacionadas con la diferenciación de geoformas. Las áreas modelo consideradas fueron (Figura 3.2):
 - **Áreas modelo de la Unidad de Pie de monte. Sector Piera:** Suelos desarrollados a partir de materiales detríticos con gravas de rocas metamórficas. **Sector Torrelavit:** Suelos desarrollados a partir de materiales detríticos con gravas calizas
 - **Áreas modelo de la Unidad de Vertientes y barrancos. Sector Masquefa:** Suelos desarrollados a partir de calcilitas, areniscas y conglomerados sin cementar de origen continental. **Sector Sant Llorenç d'Hortons - Gelida:** Suelos desarrollados a partir de calcilitas y areniscas de origen marino.
 - **Área modelo de la Unidad de Relieve suavemente ondulado.** Suelos desarrollados a partir de calcilitas, areniscas y conglomerados sin cementar de origen continental y marino.
 - **Áreas modelo de la Unidad de Relieves aluviales recientes. Sector Monistrol d'Anoia:** Suelos desarrollados a partir de materiales detríticos finos y con calizas depositadas por el río Anoia. **Sector Riudevilles:** Suelos desarrollados a partir de materiales detríticos finos y con gravas calizas depositados por el río Riudevilles.

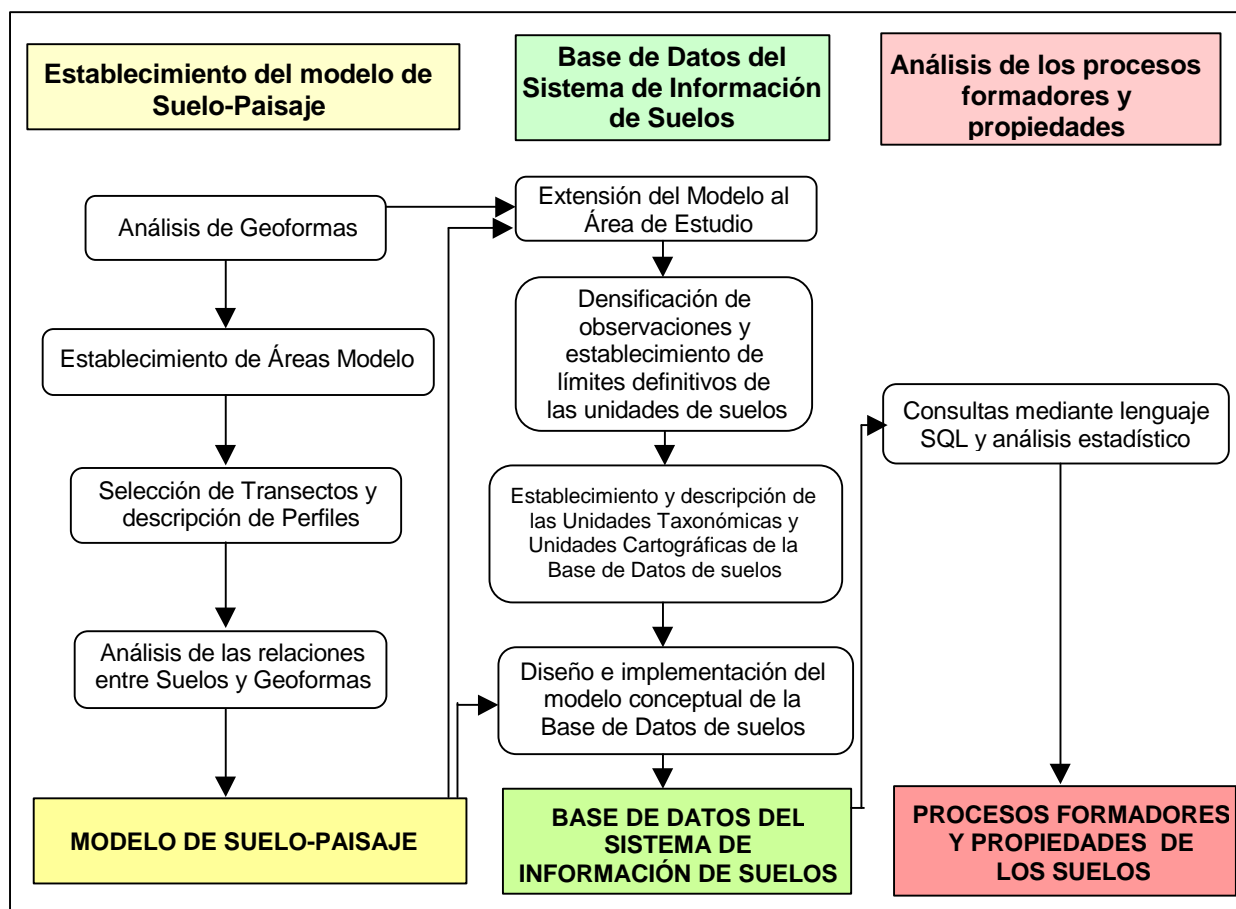


Figura 3.1. Esquema del proceso metodológico llevado a cabo para el estudio de las relaciones suelo-paisaje, diseño e implementación del sistema de información de suelos y estudio de los procesos formadores y propiedades de los suelos del Alt Penedès –Anoia.

- c) Selección de transectos y puntos de muestreo de suelos en localizaciones representativas de las geoformas a identificadas, mediante fotointerpretación. En total fueron considerados 88 puntos de muestreo donde se describieron 88 perfiles de suelos mediante la apertura de calicatas. Estos perfiles fueron distribuidos en las 5 áreas modelo consideradas (Figura 3.2).
- d) Descripción y caracterización de los suelos. Los perfiles se describieron según los sistemas SINEDARES (C.B.D.S.A. 1983) y CatSIS (Boixadera *et al.* 1989a). La denominación genética de horizontes se realizó según la nomenclatura propuesta por Herrero *et al.* (1993). La clasificación taxonómica se hizo según el sistema Soil Taxonomy (SSS 1975 y 1996) y el sistema utilizado para la leyenda del mapa mundial de suelos de FAO-Unesco (FAO 1990).

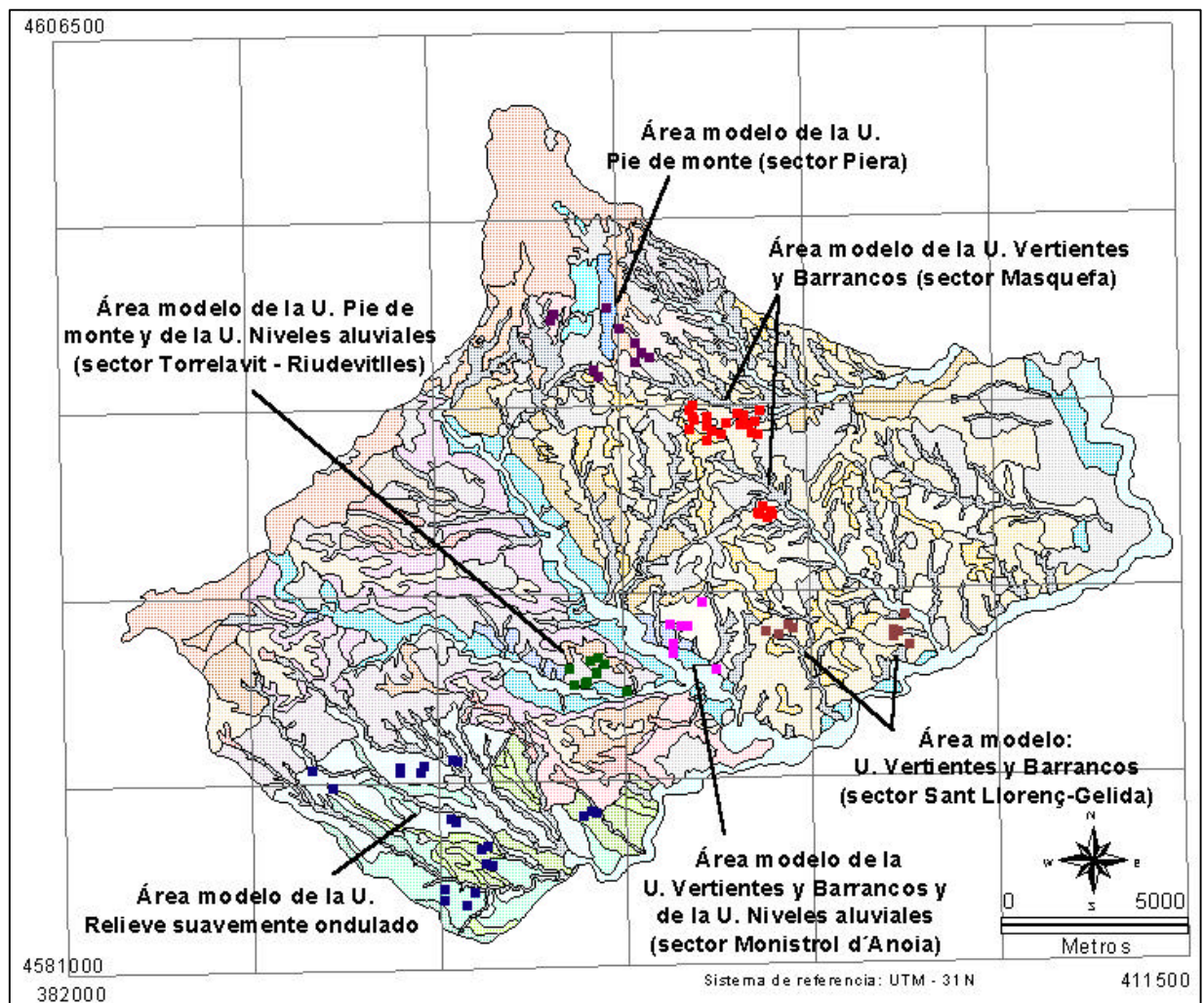


Figura 3.2. Áreas modelo para el análisis de las relaciones suelo-paisaje con la localización de los perfiles estudiados.

El nivel de detalle para la clasificación taxonómica según Soil Taxonomy, sistema utilizado como de referencia, fue el de familia, nivel adecuado para la ejecución de estudios cartográficos edafológicos semidetallados (Roquero y Porta 1986).

De los 88 perfiles estudiados, 52 se caracterizaron mediante análisis físicos y/o químicos según se detalla en la Tabla 3.1. Los métodos analíticos seguidos fueron los aprobados por los grupos de Trabajo de Suelos y Aguas de la Comisión de Métodos Oficiales de Análisis (M.A.P.A. 1986, Porta *et al.* 1986). Los objetivos de esta caracterización fisico-química fueron: posibilitar la clasificación de los suelos según los criterios morfométricos que exige Soil Taxonomy y determinar propiedades relacionadas con los procesos formadores de los suelos y en particular la erosión, así como también las propiedades relacionadas con la fertilidad de los suelos.

Tabla 3.1. Propiedades de los suelos caracterizadas y métodos empleados.

| Propiedad | Método | Núm. de perfiles analizados | Núm. De horizontes analizados |
|-------------------------------|--|-----------------------------|-------------------------------|
| pH | Suspensión al agua 1:2.5 | 51 | 169 |
| Conductividad eléctrica | Extracto al agua 1:5 | 51 | 169 |
| Materia orgánica | Deteminación volumétrica | 50 | 70 |
| Carbonato cálcico equivalente | Calcímetro Bernad | 50 | 167 |
| Caliza activa | Nijelsohn (oxalato amónico) | 37 | 39 |
| Textura | Pipeta | 46 | 128 |
| Fósforo asimilable | Olsen-Watanabe | 47 | 47 |
| Potasio asimilable | Extracción con acetato amónico pH 7.0 | 47 | 47 |
| Humedad a -33Kpa | Placas Richard (muestra seca y tamizada) | 24 | 83 |
| Humedad a -1500Kpa | Placas Richard (muestra seca y tamizada) | 24 | 83 |
| Densidad aparente | Cilindros | 11 | 31 |
| Elementos gruesos | % en peso | 4 | 14 |
| Velocidad de infiltración (*) | Doble anillo de Muntz | 10 | - |
| Conductividad hidráulica (*) | Porchet | 10 | 10 |

(*) López (1994) y Cervera (1994).

Para la determinación del valor de la clase de infiltración y de la conductividad hidráulica de los perfiles representativos de las familias de suelos se utilizaron los valores de velocidad de infiltración medidos por López (1994) y Cervera (1994) en suelos de referencia del Alt Penedès-Anoia. Estos valores representan la infiltración estabilizada tras 90 minutos, medida con infiltrómetro de doble anillo según el método de Muntz (infiltración) y según el método de Porchet (conductividad hidráulica). Para el resto de las familias de suelos, los valores representativos de la infiltración y de la conductividad hidráulica se estimaron en función de la similitud con las familias de referencia en relación a: familia de suelos y en particular la clase de tamaño de partículas de la familia, fase de textura del horizonte superficial, y profundidad efectiva.

- e) Análisis de las relaciones entre suelos y geoformas, en base a razonamiento de tipo empírico-deductivo. El resultado de este análisis condujo al establecimiento del modelo de suelo-paisaje en cada una de las áreas modelo consideradas, que fue representado en forma de una tabla compuesta por los 4 niveles categóricos inferiores del sistema de clasificación de geoformas considerado (Zinck 1988) y las clases de suelos predominantes, clasificados a nivel de familia (SSS 1975, SSS 1994).

3.2.2. Sistema de Información de Suelos

3.2.2.1. Adquisición de la información

Con la finalidad de poder llegar a representar los suelos mediante un mapa semidetallado, escala 1:50.000, el modelo de suelo-paisaje desarrollado en las áreas modelo fue extendido a toda el área de estudio por medio de la cartografía de geoformas. La consideración de la cartografía en base al establecimiento de las relaciones suelo-paisaje se justifica por el

hecho de tratarse de un área cuya morfogénesis es de tipo denudacional, donde las características de los suelos están muy ligadas a la posición geomorfológica que ocupan.

Con el fin de establecer los límites definitivos de las unidades cartográficas de suelos, así como su composición, la prospección de los suelos se completó con la realización de otras 306 observaciones (sondeos con barrena manual hasta 120 cm u horizonte limitante, y otras observaciones como cortes en caminos, zanjas, áreas de extracción, etc.).

La densidad de observaciones de suelos (calicatas más sondeos) alcanzada fue de 0.32 observaciones por cm^{-2} de mapa (1.31 observaciones por cada 100 ha), valor que cumple las especificaciones FAO (1979) y que es ligeramente superior al calculado según la ecuación propuesta por Nieves *et al.* (1985) para el cálculo de la densidad de observaciones necesaria para una cartografía de escala 1:50000. (Se aplicó un coeficiente de eficiencia edafológica $K = 15$, por tratarse de un terreno ondulado mayoritariamente sin cubierta vegetal y con apoyo de fotointerpretación). La relación calicatas/sondeos es de 0.28, acorde con las especificaciones de Boulaine (1980) aceptadas por Roquero y Porta (1986) y Aguilar (1989).

3.2.2.2. Unidades taxonómicas

Las unidades taxonómicas consideradas fueron las fases de familias. El nombre de cada familia está constituido por su nombre genérico (gran grupo y subgrupo, clase de partículas, clase mineralógica, clase de reacción calcárea, clase de temperatura y clase de profundidad). No se consideró el nombre de la serie más característica de la familia, según las recomendaciones de Wambeke y Forbes (1985), ya que no hay definidas series en el área de estudio, ni era el objetivo de la presente investigación definir las.

A fin de proveer subdivisiones de las familias, para tener en cuenta propiedades de los suelos con incidencia importante en el manejo, se definieron fases de textura del horizonte superficial (0-30 cm) y fases de profundidad del suelo cuando existe alguna limitación por capas limitantes antes de los 120 cm.

3.2.2.3. Unidades cartográficas

Las unidades cartográficas empleadas, según los criterios del SCS-USDA (Wambeke y Forbes (1985) fueron: consociaciones, asociaciones y complejos de fases de familias, y áreas misceláneas.

Las áreas misceláneas consideradas fueron: áreas urbanas e industriales, áreas de extracción de áridos, badlands y barrancos. Las áreas de badlands incluyen tierras, disectadas por numerosas cárcavas. Pueden contener algunas inclusiones de suelos identificables donde se desarrolla vegetación arbustiva o arbórea. Las áreas de barrancos consisten en áreas donde la erosión ha producido formas de incisión en U o V. Sus paredes son fuertemente inclinadas o escarpadas, sometidas en muchos casos a procesos como movimientos de masa. En estas paredes se incluyen suelos identificables, donde se desarrolla vegetación arbustiva o arbórea, en mayor cantidad que en los badlands. Sin embargo fueron consideradas como áreas misceláneas por tratarse de áreas marginales, sin

interés agrícola por su excesiva pendiente y por los procesos erosivos a las que están sometidas.

El esfuerzo de campo se dirigió a intentar lograr el máximo número de consociaciones aunque, tratándose de una cartografía semidetallada, abundan las asociaciones y complejos de familias.

La diferenciación de las unidades cartográficas se hizo en base a los siguientes criterios: número de componentes taxonómicos en la unidad, grado de similitud entre componentes, escala a la que pueden ser cartografiados separadamente, presencia de los componentes en cada delineación, porcentaje de los componentes en cada delineación, porcentaje de inclusiones limitativas, regularidad de distribución de los componentes.

La información que contiene una unidad cartográfica es:

- Tipo de unidad: consociación, asociación, complejo o área miscelánea.
- Componentes taxonómicos. (Están representados por perfiles modales que recogen el intervalo de variación de los suelos pertenecientes al taxon considerado).
- Porcentaje de cada componente.
- Localización o patrón de distribución de los componentes en la unidad. (En el caso de asociaciones se puede distinguir diferentes componentes en distintas formas del relieve).
- Unidad de relieve o geoforma en la que está incluida la unidad cartográfica.
- Inclusiones, con indicación de sí son o no limitativas. (Inclusiones limitativas son las que suponen restricciones significativamente más severas para el uso que el suelo dominante o afecta a requerimientos de manejo).

La delineación de los límites de los diferentes componentes espaciales de las unidades cartográficas (delineaciones) se basó en: a) geometría de las geoformas, b) en la comprobación de límites mediante sondeos y c) delineación de nuevos límites de suelos (dentro de las geoformas consideradas) a partir de las observaciones de los sondeos.

Como material de teledetección se utilizaron fotografías aéreas a escala aproximada 1:30.000, correspondientes al vuelo nacional del Instituto Geográfico Nacional e Institut Cartogràfic de Catalunya de los años 1984 y 1986. Como base cartográfica de campo se utilizaron ortofotomapas a escala 1:25.000 del Institut Cartogràfic de Catalunya. Las delineaciones de las unidades cartográficas del mapa de suelos se representaron a escala 1:50000, utilizando como base el ortofotograma de Cataluña del Institut Cartogràfic de Catalunya (hojas núm. 319, 320, 419, 420). Finalmente, estas delineaciones (componente espacial del mapa de suelos) se digitalizaron en el formato vectorial topológico, asociando a cada polígono o delineación el código de la unidad cartográfica. Este código es el que conecta el componente geométrico del mapa con el componente temático de las unidades cartográficas.

3.2.2.4. Leyenda del mapa de suelos

Como leyenda de la representación gráfica de la base de datos espacial de suelos (mapa de suelos), se empleó una leyenda con entrada geomorfológica como la usada para la expresión del modelo suelo-paisaje. La leyenda recoge 3 de los 4 niveles categóricos inferiores de este sistema: Grupo (paisaje), Subgrupo (relieve) y Familia (litología del material originario de los suelos). El último nivel, Subfamilia (forma del terreno), no se reflejó en la leyenda para evitar una mayor complejidad de esta, aunque esta información sí está registrada en la base de datos para los casos de consociaciones y asociaciones de suelos, donde es posible asociar a este nivel de detalle los suelos y la posición en la forma del terreno que ocupan.

3.2.2.5. Diseño de la base de datos del Sistema de Información de Suelos

Las bases de datos de suelos suelen reflejar la estructura de la información espacial de suelos (mapa de suelos) a partir de la cual fueron creados (Frigolé 1997).

En la presente investigación se propone un modelo conceptual de organización de la base de datos cuya entidad principal refleje las relaciones suelo-paisaje subyacentes en la información de suelos adquirida. La entidad que cumple estos requisitos es la unidad cartográfica, que contiene información sobre los componentes de suelos, de paisaje, y además tiene representación espacial a través de las delineaciones del mapa.

Para el registro de la información de suelos (geometría+atributos) en una base de datos espacial se eligió el modelo vectorial topológico (Molenaar 1993). Según este modelo de datos la información geométrica se compone de polígonos (delineaciones) de las unidades cartográficas. Se conecta a las tablas, que contienen los atributos descriptivos de las unidades cartográficas, por medio del identificador o código de la unidad cartográfica a la que pertenecen las delineaciones de suelos. Estas tablas contienen información sobre los componentes de las unidades cartográficas, descripciones de perfiles descritos en campo, perfiles modales y relaciones suelo-paisaje. La componente geométrica se almacena según un formato vectorial y la temática según el modelo de base de datos relacional.

Las tablas del modelo relacional deben cumplir una serie de normas y las relaciones entre entidades deben estar definidas por unas reglas, denominadas de la aplicación (Date 1990). Las bases y reglas consideradas para el diseño del modelo conceptual de la base de datos espacial de suelos se detallan en la Tabla 3.2. Estas reglas hacen referencia a las relaciones entre las diferentes entidades en las que se estructura la información generada durante la prospección de suelos: delineaciones del mapa, unidades cartográficas, unidades taxonómicas, unidades de paisaje y geoformas, perfiles descritos en campo y perfiles modales.

El modelo conceptual de base de datos de suelos se tradujo a un modelo físico vectorial topológico utilizando el programa Arcinfo (ESRI, versión PC3.5D). Este programa también sirvió para la edición de datos geométricos. La digitalización se realizó a partir de las delineaciones del mapa de suelos sobre el ortofotomapa E. 1:50.000, utilizando una tabla digitalizadora Calcomp Drawingboard III, (precisión ± 0.25 mm en unidades de mapa o ± 12.5 m en unidades de terreno). El sistema de georeferenciación elegido fue el UTM

huso 31N. Para la creación de tablas, entrada y gestión de datos temáticos se utilizó el gestor de bases de datos relacional Access (Microsoft, versión 7.0).

Tabla 3.2. Bases del diseño y reglas para la definición de la base de datos de suelos.

| Bases del diseño | Reglas |
|---|---|
| <p>La delineación es la unidad espacial básica, y contiene información geométrica y temática. Se relaciona con la unidad cartográfica de suelos mediante una relación uno a muchos (1:M). La unidad cartográfica es el conjunto de delineaciones que tienen el mismo símbolo.</p> | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Una unidad cartográfica de suelos tiene al menos una delineación. ▪ Una delineación pertenece a una única unidad cartográfica de suelos. |
| <p>La unidad cartográfica de suelos es la entidad básica que contiene información sobre los componentes del suelo y paisaje.</p> | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Una unidad cartográfica está contenida en una geoforma. ▪ Una geoforma puede contener una o más unidades cartográficas de suelos. ▪ Una unidad cartográfica de suelos puede contener más de una clase de suelos, (representada por su perfil modal). ▪ Una clase de suelos puede estar presente en más de una unidad cartográfica. |
| <p>La unidad de paisajes es la entidad que agrupa a diferentes geoformas, que se asocian o repiten en el espacio geográfico según un determinado patrón.</p> | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Una unidad de paisaje tiene al menos una geoforma. ▪ Una geoforma debe pertenecer a una unidad de paisaje. |
| <p>Cada familia de suelos debería estar representada por un perfil modal, que recoge el intervalo de variación de las propiedades de los distintos perfiles tipo de la familia. Sin embargo, se ha considerado de interés el poder reflejar diferencias respecto a propiedades limitantes diferenciales como la profundidad de los suelos. En este sentido se considera como diferentes perfiles modales de la misma familia a suelos con diferente clase de profundidad.</p> | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Una familia de suelos puede tener más de un perfil modal. ▪ Un perfil modal debe pertenecer a una única familia de suelos . |
| <p>Un perfil modal agrupa horizontes con diferentes características y se admite que un mismo horizonte (modal) solamente puede encontrarse en un perfil modal. Horizontes que solamente varían en su espesor se han considerado diferentes (aunque conservan iguales el resto de sus características) a efectos del diseño de la base de datos. (Los valores de características como la profundidad de suelos o textura del horizonte superficial se incorporarán a nivel de fase en la entidad de la unidad cartográfica). Por otra parte, los perfiles modales de una familia se definen en base a perfiles tipo con existencia real. Estos contienen información relativa al perfil, que se describe y codifica en campo.</p> | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Un perfil modal tiene uno o más horizontes. ▪ Un horizonte sólo está presente en un único perfil modal. ▪ Un perfil modal se define en base a uno o más perfiles tipo con existencia real. ▪ Un perfil tipo entra en la definición de un único perfil modal. |
| <p>Un perfil tipo se compone de horizontes, con existencia real, cuyas características se describen morfométrica y analíticamente.</p> | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Un perfil tipo tiene uno o más horizontes. ▪ Un horizonte está presente en un único perfil tipo. |

3.2.3. Análisis de los procesos formadores y características de los suelos

A partir de la información de suelos relativa a los perfiles estudiados, y a su posición en el paisaje, se llevó a cabo un análisis conducente a la caracterización de los procesos formadores de los suelos en el área de estudio, y en particular de la erosión.

El análisis fue realizado a partir de consultas mediante lenguaje de consulta estructurado o SQL (Structured Query Language), utilizando las tablas que componen la base de datos relacional del sistema de información de suelos implementado. Los resultados de las diferentes consultas fueron analizados mediante tests estadísticos de separación de medias y pruebas de independencia (t-Student y Chi-cuadrado), utilizando las funciones del programa Excel (Microsoft, versión 7.0).

3.3. Resultados y discusión

3.3.1. Consideraciones sobre la denominación y clasificación de horizontes y suelos del área de estudio

Varios problemas fueron encontrados a la hora de realizar la descripción y clasificación de los suelos estudiados en el Alt Penedès – Anoia. Los principales son los relativos a la denominación de horizontes genéticos en el caso de calcilitas o areniscas incoherentes con acumulaciones de carbonato cálcico, y a la diagnosis de estos horizontes como endopediones cálcicos.

En 7 de los 88 perfiles estudiados se describieron capas de calcilitas o areniscas incoherentes con acumulaciones secundarias de carbonato cálcico en forma de nódulos y/o rizoconcreciones. Estos suelos son característicos del área de vertientes y barrancos y del área de relieve suavemente ondulado.

Atendiendo a la denominación de horizontes genéticos de Herrero *et al.* (1993), estos son horizontes Cr y no Bw, ya que presentan la estructura original sedimentaria en más del 50% de su volumen. Su denominación genética se completó con el sufijo kn para indicar la presencia de nódulos y/o concreciones de carbonato cálcico.

En el caso de que los procesos edafogénicos hayan alterado la estructura del material originario, se les denominó como horizontes Bw, añadiéndoles el sufijo kn a los que han sufrido procesos de calcificación y presentan nódulos y/o concreciones de carbonato cálcico. La denominación como horizontes Bwkn puede resultar problemática, ya que supone poder reconocer como actuales acumulaciones heredadas del material originario.

El hecho de plantearse la duda sobre el origen de las acumulaciones existentes en los materiales originarios también cuestiona la diagnosis de estos horizontes y de los originados a partir de ellos, por edafogénesis, como horizontes cálcicos.

Por definición, un horizonte cálcico es un horizonte de acumulación, en este caso de carbonato cálcico u otros carbonatos hasta un nivel significativo. Esta acumulación puede reconocerse por un mayor contenido de carbonato cálcico respecto al horizonte inferior o por la identificación y cantidad de formas de acumulación (SSS 1994).

Los perfiles descritos con horizontes Bwkn (desarrollados por edafogénesis en calcilitas) y Crkn presentan las características de horizontes diagnóstico cálcicos:

- 15% CO₃Ca equivalente y ≥ 5% CO₃Ca equivalente que el horizonte subyacente o,
- 15% CO₃Ca equivalente y ≥ 5% en volumen de acumulaciones secundarias de carbonatos identificables.

Esto puede comprobarse en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Carbonato cálcico equivalente y acumulaciones de carbonato cálcico en perfiles con horizontes Bwkn (edafogénesis en calcilitas) y Crkn.

| Perfil | Horizonte genético | CO ₃ Ca (%) | Acumulaciones (% en volumen) | Tipo |
|--------|--------------------|------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| PP43 | Ap | 52.4 | - | - |
| | Ap/Bwkn1 | 55.0 | 20-40 | Nódulos y rizoconcrecciones |
| | Bwkn1 | 48.4 | >40 | Nódulos y rizoconcrecciones |
| | Crkn2 | 45.5 | >40 (disminuyendo en profundidad) | Nódulos |
| PP50 | Ap | 20.0 | - | - |
| | Crkn1 | 67.9 | >40 | Nódulos |
| | Crkn2 | 18.5 | 2-20 | Nódulos |

En otros perfiles de este tipo, de los que no se dispone de análisis del CO₃Ca equivalente (ML25, PP49, PP52 y TL60), también se han descrito acumulaciones secundarias de carbonato cálcico, siempre mayores del 20% en volumen, generalmente en forma de nódulos, y que tienen la característica de disminuir en profundidad. Por tanto, los horizontes Bwkn (en calcilitas) y Crkn se han considerado como horizontes diagnóstico cálcico.

Respecto al origen de las acumulaciones, se observó que las descritas en materiales terciarios tienen similares características de morfología y dureza que las descritas en horizontes Bwkn desarrollados en materiales detríticos finos o finos con gravas. Por otra parte, la incoherencia de los materiales terciarios y sus características texturales, texturas de moderadamente gruesas a moderadamente finas, ha podido permitir el desarrollo de acumulaciones en capas cercanas a la superficie actual del suelo. Estos hechos apoyan la hipótesis de que estas acumulaciones puedan ser debidas a procesos más recientes que los sinsedimentarios. Más difícil resulta asegurar si el proceso de acumulación de carbonato cálcico en estos horizontes continúa actualmente o si estos horizontes son heredados de suelos afectados recientemente por la erosión.

3.3.2. Clasificación de los suelos

Los 88 perfiles de suelos estudiados en el Alt Penedès – Anoia fueron clasificados en 22 familias de suelos (Tabla 3.4). También en esta tabla se incluyen los 251 sondeos realizados mediante barrena manual, que fueron utilizados posteriormente en el proceso de cartografía de suelos.

Tabla 3.4. Familias de suelos descritos en el Alt Penedès – Anoia, según el sistema de clasificación de suelos Soil Taxonomy (SSS 1975, SSS 1994) y correspondencia con el sistema de clasificación FAO-UNESCO (FAO 1990).

| Código de la familia | Familia (SSS 1975, SSS 1994) | Clasificación FAO (1990) | Nº de perfiles | Nº de sondeos |
|----------------------|---|--------------------------|----------------|---------------|
| APP1 | Palixeralf petrocálcico, arcillosa fina, mezclada, térmica. | Luvisol cálcico | 2 | 0 |
| AHC1 | Haploxeralf cálcico, franca fina, carbonática, térmica. | Luvisol cálcico | 1 | 4 |
| AHT1 | Haploxeralf típico, esquelético franca, mezclada (calcárea), térmica. | Luvisol háplico | 1 | 3 |
| IXP1 | Xerochrept petrocálcico, franca gruesa, mezclada, térmica, superficial. | Calcisol pétrico | 2 | 13 |
| IXP2 | Xerochrept petrocálcico, franca, mezclada, térmica, superficial. | Calcisol pétrico | 5 | 39 |
| IXF1 | Xerochrept fluvéntico, franca fina, mezclada, térmica. | Calcisol háplico | 7 | 24 |
| IXC1 | Xerochrept calcixeróllico, franca fina, mezclada, térmica. | Calcisol háplico | 9 | 25 |
| IXC2 | Xerochrept calcixeróllico, esquelética arenosa, carbonática, térmica. | Calcisol háplico | 4 | 16 |
| IXC3 | Xerochrept calcixeróllico, esquelética franca, mezclada, térmica. | Calcisol háplico | 1 | 2 |
| IXC4 | Xerochrept calcixeróllico, limosa gruesa, carbonática, térmica. | Calcisol háplico | 4 | 2 |
| IXC5 | Xerochrept calcixeróllico, arenosa, mezclada, térmica. | Calcisol háplico | 2 | 6 |
| IXC6 | Xerochrept calcixeróllico, franca gruesa, mezclada, térmica. | Calcisol háplico | 7 | 20 |
| IXC7 | Xerochrept calcixeróllico, limosa fina, carbonática, térmica. | Calcisol háplico | 4 | 18 |
| IXC9 | Xerochrept calcixeróllico, franca gruesa, carbonática, térmica. | Calcisol háplico | 6 | 7 |
| IXT1 | Xerochrept típico, franca gruesa, mezclada, térmica. | Cambisol eútrico | 2 | 3 |
| IXA1 | Xerochrept acuico, franca gruesa, mezclada, térmica. | Calcisol gleyi-háplico | 1 | 1 |
| EXF1 | Xerofluvent típico, limosa fina, mezclada (calcárea), térmica. | Fluvisol calcáreo | 6 | 9 |
| EXF3 | Xerofluvent típico, franca gruesa, mezclada (calcárea), térmica. | Fluvisol calcáreo | 5 | 10 |
| EXT1 | Xerorthent típico, limosa, mezclada (calcárea), térmica, superficial. | Regosol calcáreo | 7 | 5 |
| EXT2 | Xerorthent típico, franca, mezclada (calcárea), térmica, superficial. | Regosol calcáreo | 11 | 39 |
| EXL1 | Xerorthent lítico, franca, mezclada (no acida), térmica, superficial | Regosol eútrico | 1 | 4 |
| EXL2 | Xerorthent lítico, franca, mezclada (calcárea), térmica, superficial | Regosol calcáreo | 1 | 1 |

Los dos principales subgrupos de suelos descritos en el Alt Penedès – Anoia son primero los Xerochrepts calcixeróllicos y después los Xerorthents típicos, lo cual se refleja en la frecuencia de los perfiles y sondeos estudiados. También son frecuentes los Xerochrepts fluvénticos, que presentan endopediones cálcicos, y los Xerochrepts petrocálcicos.

Destaca la frecuencia de suelos con mineralogía carbonática (22% de los perfiles y 19% de los sondeos estudiados), lo cual indica la intensidad de los procesos de calcificación en los suelos del área de estudio.

Los alfisoles, a pesar de que otros autores hablan de la abundancia de suelos con procesos de argiluvación (Gallart 1981), presentan frecuencias muy bajas, constituyendo relictos, lo cual concuerda con las observaciones realizadas por Boixadera (1983) en la zona de Piera – Masquefa.

Las familias menos frecuentes son los Xerochrepts acuicos y los Xerochrepts típicos. Ello indica que estos suelos aparecen de forma muy localizada, en el primer caso asociados a áreas con mal drenaje actual y en el segundo asociados a áreas fuente de materiales originarios no calcáreos, que se dan de forma localizada en los alrededores de Vallbona d'Anoia y Piera.

3.3.3. Modelo de suelo-paisaje

La descripción de los perfiles de suelos en posiciones representativas de geoformas de las diferentes áreas modelo permitió definir el modelo de suelo-paisaje para cada una de las unidades de paisaje identificadas en el área de estudio.

3.3.3.1. Suelos del área de montaña (Sierra Prelitoral)

Los suelos descritos en el área de montaña son mayoritariamente Xerorthents líticos, de clase textural franca. Los del área al norte del río Anoia, donde aflora el zócalo paleozoico, se caracterizan por la presencia de un contacto de esquistos y/o cuarcitas en el área norte de la unidad. En el área al sur del Anoia el contacto lítico es con rocas calizas. Se distinguen dos clases mineralógicas según la litología de los materiales originarios: la clase mezclada (no ácida) en las áreas donde aflora el zócalo paleozoico, y la clase mezclada (calcárea) donde afloran las calizas mesozoicas.

Los suelos del área de montaña son poco profundos. Dominan los procesos erosivos debido a la elevada pendiente de las vertientes (escarpadas o muy escarpadas, con pendientes >25%) donde se localizan. Como horizonte diagnóstico presentan un epipedión óchrico, con alrededor del 4% de materia orgánica.

El modelo suelo-paisaje de esta unidad de paisaje se presenta en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Modelo de suelo-paisaje del área de montaña (Sierra Prelitoral).

| Geoformas | Material originario | Suelos |
|--|--------------------------|--|
| Vertientes escarpadas o muy escarpadas, (pendiente >20%) | Esquistos y cuarcitas | Xerorthents líticos , franca, mezclada (no ácida), térmica. |
| | Rocas calizas y dolomías | Xerorthents líticos , franca, mezclada (calcárea), térmica. |

3.3.3.2. Suelos del área de pie de monte

En esta unidad de paisaje se han distinguido dos patrones principales de suelos según el área fuente de los materiales originarios en la Sierra Prelitoral.

El área de pie de monte conectada al afloramiento del zócalo paleozoico, se caracteriza por presentar suelos desarrollados en materiales detríticos finos o con gravas de rocas metamórficas. En las superficies más llanas, en materiales finos se han desarrollado Palexeralfs petrocálcicos, de clase de tamaño de partículas (en adelante “clase textural”) arcillosa fina (Figura 3.3a). En estas mismas posiciones, pero en materiales detríticos con gravas, se han desarrollado Haploxeralfs típicos (Figura 3.3b) y Xerochrepts calcixeróllicos esquelético-francos.

Algunos de estos suelos presentan evidencias de truncamiento de los horizontes superficiales, signo de la ocurrencia de procesos de erosión hídrica (Figura 3.3a). Esto indica un punto de inflexión en el proceso evolutivo de estos suelos, ligado a la dinámica denudacional actual de estas geoformas. Las observaciones de campo sobre la incisión de cárcavas a favor de pequeños fondos y desagües de las parcelas de viña que se dan en estas geoformas confirman esta dinámica actual erosiva.

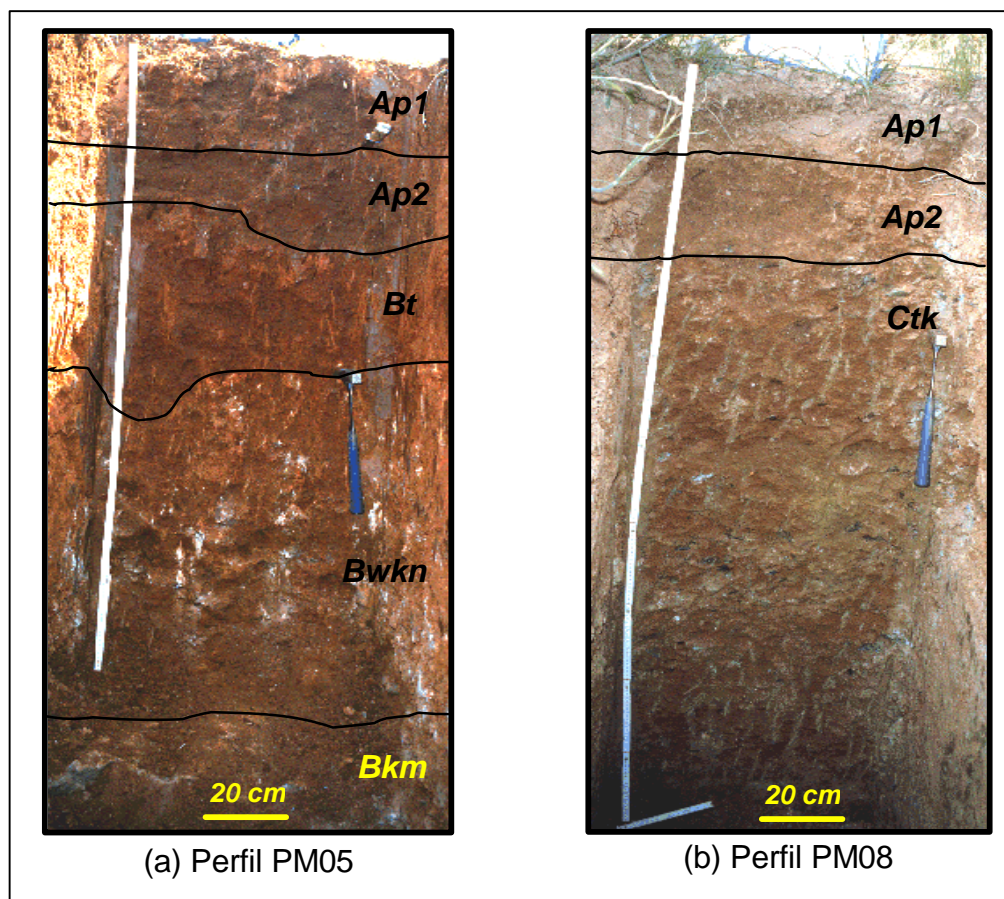


Figura 3.3. (a) Perfil PM05 (Palexeralf petrocálcico, arcillosa fina, mezclada, térmica), y (b) perfil PM08 (Haploxeralf típico, esquelético franca, mezclada, térmica), ambos en las Planas de Mas Marquet (entre Piera y Hostalets de Pierola).

Este hecho también se ve reflejado en las vertientes de pendiente suave a moderada (3-10% de pendiente), que circundan las superficies llanas de glaciais anteriormente descritas, y que están más directamente conectadas a la incipiente red de cárcavas. Los suelos descritos en estas geoformas son Xerochrepts calcixeróllicos de clases texturales franca fina (Figura 3.4 a y b) y limosa fina, y Xerofluvents típicos con clase de tamaño de partículas limosa fina, que aparecen en estrechos fondos todavía no afectados por las cárcavas. En general, los suelos de estas vertientes son muy profundos, bien drenados, y tienen una capa de calcilutitas como material subyacente. En la parte inferior de las vertientes, donde deberían aparecer suelos profundos o muy profundos, aparecen suelos moderadamente profundos, con las calcilutitas a 60-80 cm de profundidad desde la superficie (Figura 3.4b). Este hecho, también observado en otras geoformas similares del área de estudio, evidencia la intensa erosión laminar que se produce en las áreas adyacentes a las cárcavas. Este fenómeno fue explicado por Brooks *et al.* (1991) mediante el concepto de área fuente variable, referente a los mecanismos de generación de escorrentía en pequeñas cuencas, o en áreas con escasa pendiente. Este concepto explica que las áreas que más rápidamente se saturan son las adyacentes a la red de drenaje y son las que más contribuyen a la generación de flujo superficial, y las que sufren procesos de erosión laminar más intensos.

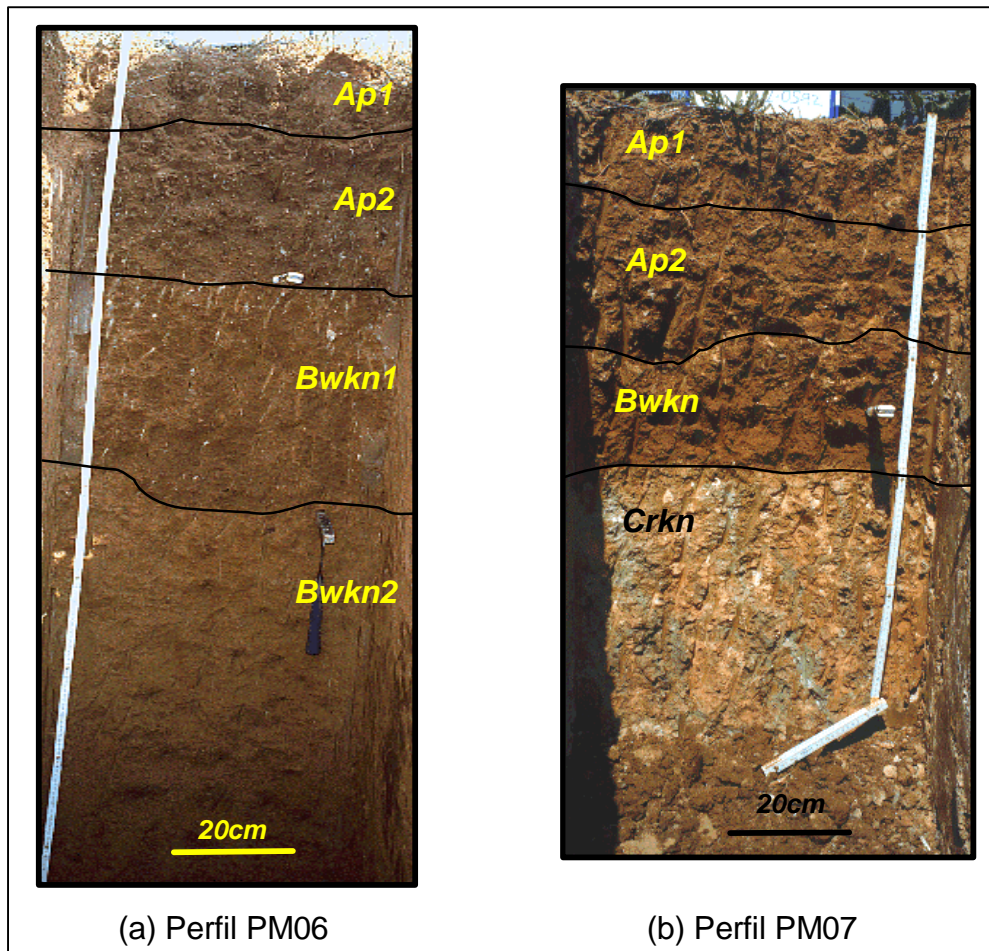


Figura 3.4. (a) Perfil PM06 (Xerochrept calcixeróllico, franca fina, mezclada, térmica), y (b) perfil PM07 (Xerochrept calcixeróllico, limosa fina, mezclada, térmica), ambos en el área colindante a las Planas de Mas Marquet (entre Piera y Hostalets de Pierola).

En algunas vertientes moderadamente inclinadas, se han descrito suelos menos evolucionados, Xerochrepts típicos con clase textural franca gruesa y mineralogía mezclada. Son suelos moderadamente profundos o profundos desarrollados en materiales detríticos finos con gravas de rocas metamórficas, que se caracterizan por la presencia de un endopedión cámbico.

En las plataformas residuales del área sur de la unidad de paisaje de pie de monte, en materiales detríticos con gravas (predominantemente calizas) se han desarrollado Xerochrepts petrocálcicos de clase textural franca. Estos suelos son poco profundos. Presentan un epipedión óchrico, y un endopedión petrocálcico a menos de 50 cm desde la superficie (Figura 3.5a). Gran parte de estas plataformas están disectadas por fondos, donde se han desarrollado Xerochrepts fluvénticos de clase textural limosa fina. En zonas concretas de estas superficies residuales aparecen Haploxeralfs cálcicos de clase textural franca fina y de mineralogía carbonática (Figura 3.5b). Estos suelos presentan un horizonte argílico intensamente recalificado, que actualmente constituye el horizonte superficial debido a la erosión del horizonte A original.

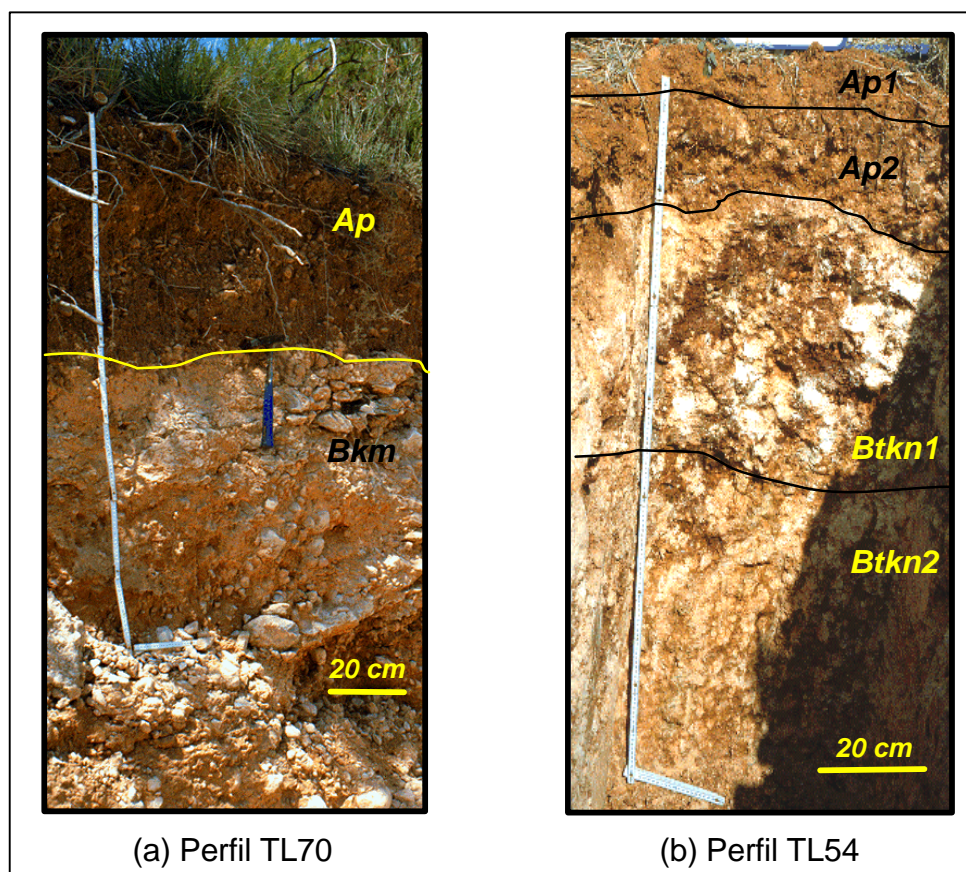


Figura 3.5. (a) Perfil TL70 (Xerochrept petrocàlcico, franca, mezclada, térmica, superficial) en el Carrer de Can Rosell, y (b) perfil TL54 (Haploxeralf càlcico, franca fina, carbonàtica, térmica) en Can Cardús (Torrelavit).

En el escarpe de las plataformas residuales aparecen Xeroorthents típicos de clase textural franca, poco profundos y Xerochrepts calcixeróllicos de clase textural franca fina, moderadamente profundos. Estos suelos se han desarrollado en calcilitas. En las partes inferiores del escarpe, que es donde suelen aparecer los Xerochreptss calcixeróllicos, en materiales detríticos finos de origen coluvial .

El tramo de vertiente que enlaza los escarpes con el valle, presenta vertientes complejas, fuertemente inclinadas (5-15 % de pendiente), donde se alternan diferentes tipos de suelos en función del material originario. Los suelos desarrollados en calcilitas son Xeroorthents típicos de clase textural franca y poco profundos. En numerosos casos el epipedión óchrico original de estos suelos ha sido lavado por la erosión y, actualmente, afloran las calcilitas que son las que constituyen el horizonte de laboreo. Los suelos desarrollados en materiales detríticos finos de origen coluvial y en calcilitas, en tramos de vertiente con menos pendiente, son Xerochrepts calcixeróllicos de clase textural franca gruesa, que pueden ser profundos o muy profundos.

En este tramo de vertiente entre los escarpes de las plataformas y el valle es frecuente la aparición de una serie de resaltes residuales, donde se alternan Xerochrepts petrocàlcicos

de clase textural franca, poco profundos (Figura 3.6a), Xerorthents típicos de clase textural franca, poco profundos, y Xerochrepts fluvénticos de clase textural limosa fina (Figura 3.6b).

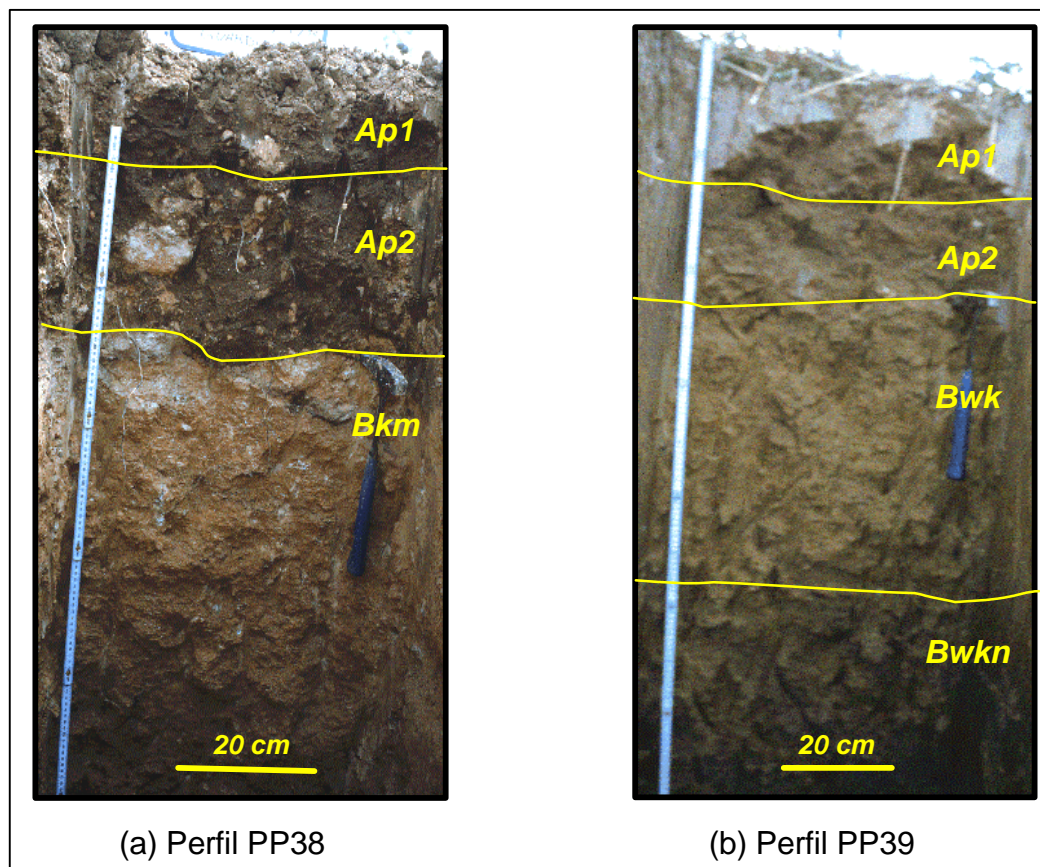


Figura 3.6. (a) Perfil PP38 (Xerochrept petrocálcico, franca, mezclada, superficial, térmica) en Can Suriol (Guardiola de Font Rubí), y (b) perfil PP39 (Xerochrept fluvéntico, limosa fina, mezclada, térmica) en El Fons de Can Calix (Guardiola de Font Rubí).

A modo de resumen, la Tabla 3.6 recoge las relaciones suelo-paisaje descritas en la unidad de pie de monte, que posteriormente han servido de apoyo a la cartografía de los suelos de esta unidad.

Tabla 3.6. Modelo suelo-paisaje del área de pie de monte.

| Geoformas | Material originario | Suelos |
|---|---|--|
| Plataformas residuales poco disectadas, elevadas 140-160 m sobre los cauces principales del área, (pendiente 5-15%) | Depósitos detríticos con gravas poligénicas | Xerochrepts petrocálcicos , franca, mezclada, térmica, superficial. |
| Plataformas residuales poco disectadas, elevadas 90-110 m sobre los cauces principales del área, (pendiente 5-15%) | Depósitos detríticos con gravas poligénicas | Xerochrepts petrocálcicos , franca, mezclada, térmica, superficial. |
| Plataformas residuales disectadas, elevadas 140-160 m sobre los cauces principales del área, (pendiente 5-15%) | Depósitos detríticos finos con gravas poligénicas | Xerochrepts petrocálcicos , franca, mezclada, térmica, superficial. Xerochrepts fluvénticos limosa fina, mezclada, térmica. |
| Glacis (pendiente 5-15%) | Depósitos detríticos finos con gravas de rocas metamórficas | Palexeralfs petrocálcicos , arcillosa fina, mezclada, térmica. Haploxeralfs típicos , Esquelética franca, mezclada, térmica. Xerochrepts calcixeróllicos , esquelética franca, mezclada, térmica. Xerochrepts calcixeróllicos , franca fina, carbonática, térmica. |
| Vertientes, de suave a moderadamente inclinadas, (pendiente 1-10%) | Depósitos detríticos finos y calcilitas | Xerochrepts calcixeróllicos , franca fina, mezclada, térmica. Xerofluents típicos , limosa fina, mezclada (calcárea), térmica. |
| Vertientes, moderadamente inclinadas, (pendiente 5-15%) | Depósitos detríticos con gravas de rocas metamórficas | Xerochrepts típicos , franca gruesa, mezclada, térmica. |
| | Depósitos detríticos finos | Xerochrepts calcixeróllicos , limosa fina, mezclada, térmica. |
| Vertientes complejas, fuertemente inclinadas, (pendiente 5-15%) | Calcilitas | Xerorthents típicos , Franca, mezclada (calcárea), térmica, superficial. |
| | Depósitos detríticos finos con gravas poligénicas | Xerochrepts petrocálcicos , franca, mezclada, térmica, superficial. Xerochrepts petrocálcicos , franca gruesa, mezclada, térmica. Xerochrepts fluvénticos limosa fina, mezclada, térmica. Xerochrepts calcixeróllicos , limosa gruesa, carbonática, térmica. Xerorthents típicos , franca, mezclada (calcárea), térmica, superficial. |
| | Depósitos detríticos finos y calcilitas | Xerochrepts calcixeróllicos , franca gruesa, mezclada, térmica, (prof. 100-150 cm). Xerochrepts calcixeróllicos , franca gruesa, carbonática, térmica. |
| Vertientes, de moderadamente escarpadas a escarpadas, (pendiente 20-30%) | Depósitos detríticos finos y calcilitas | Xerochrepts calcixeróllicos , franca fina, mezclada, térmica, (prof. 50-100 cm). Xerorthents típicos , franca, mezclada (calcárea), térmica, superficial |
| Fondos, (pendiente 5-15%) | Depósitos detríticos finos | Xerochrepts fluvénticos limosa fina, mezclada (calcárea), térmica. |

3.3.3.3. Suelos del área de vertientes y barrancos

El área de vertientes y barrancos se caracteriza por la falta casi total de relieves residuales y la alternancia en el paisaje de estrechas divisorias redondeadas, vertientes complejas y barrancos.

Las formas más elevadas son divisorias, redondeadas por el efecto de la erosión laminar. Tan solo en algunas zonas muy concretas se encuentran Xerochrepts petrocálcicos desarrollados en materiales detríticos con gravas poligénicas, poco o muy poco profundos. Los suelos más frecuentes son Xerochrepts calcixeróllicos de clase textural franca gruesa y de mineralogía carbonática, profundos o muy profundos, desarrollados en calcilitas (Figura 3.7a). El horizonte superficial de estos suelos presenta evidencias de incorporación de materiales del horizonte cálcico, con contenidos de carbonato cálcico medios del 50%. Estos suelos suelen estar plantados de viña, si bien las viñas presentan un escaso desarrollo debido a problemas de clorosis férrica.

En otras divisorias más distales a las áreas fuente de materiales se han desarrollado Xerochrepts calcixeróllicos de clase textural arenosa y mineralogía mezclada (Figura 3.7b), y Xerorthents típicos de clase textural limosa fina y poco profundos, que aparecen en los bordes de la forma.

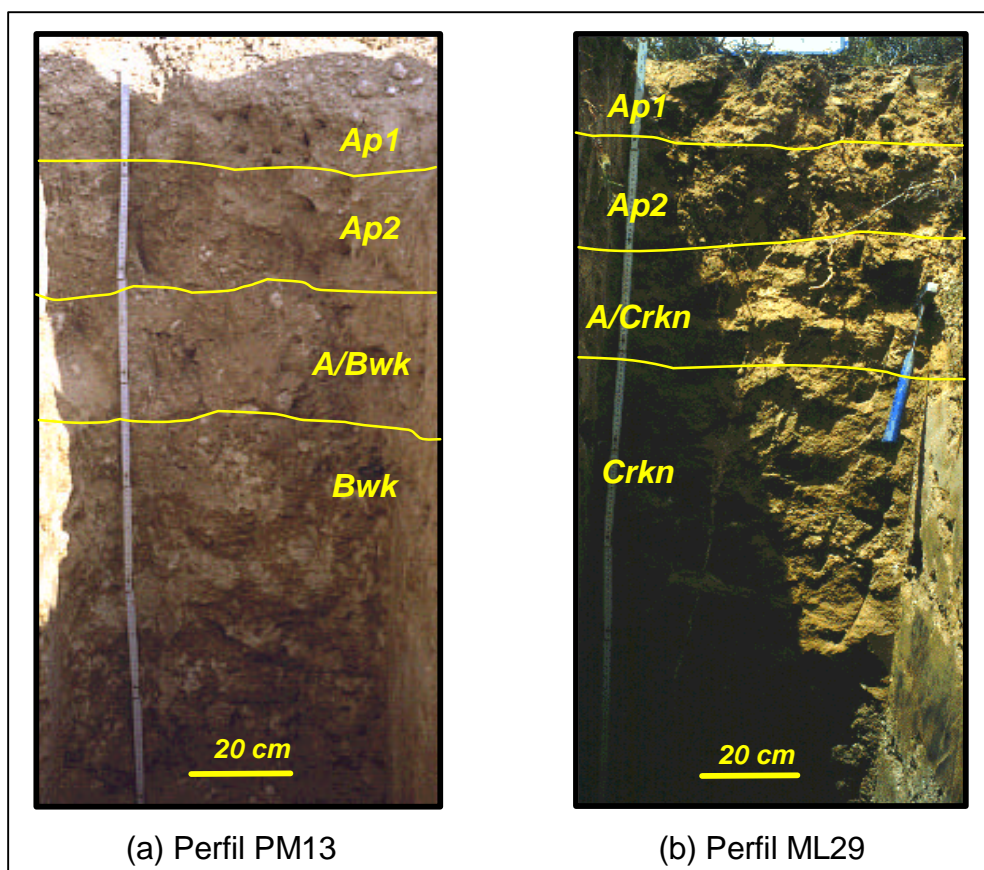


Figura 3.7. (a) Perfil PM13 (Xerochrept calcixeróllico, franca gruesa, carbonática, térmica) en Can Bonastre (Masquefa), y (b) perfil ML29 (Xerochrept calcixeróllico, arenosa, mezclada, térmica) en Can Atalaya (Gelida).

Los suelos de las vertientes complejas, fuertemente inclinadas (con pendientes entre 5-15 %) se han desarrollado en calcilitas, areniscas y conglomerados incoherentes, y en materiales detríticos finos de origen coluvial. Abundan los Xerochrepts calcixeróllicos, que

pertenecen a diferentes familias. Los de clase textural franca gruesa y mineralogía mezclada se han desarrollado generalmente en los lentejones de materiales detríticos con gravas poligénicas (conglomerados incoherentes), que afloran de forma aleatoria en toda esta unidad de paisaje (Figura 3.8a). El horizonte superficial de estos suelos suele presentar frecuentes elementos gruesos por la mezcla de materiales de horizontes Bwkn y Bk subyacentes, que presentan un contenido de gravas entre frecuente y muy abundante.

Los Xerochrepts calcixeróllicos de clase textural franca fina y mineralogía mezclada se han desarrollado en calcilutitas o en detríticos finos. En general son suelos profundos o muy profundos que presentan un endopedión cálcico con frecuentes acumulaciones de carbonato cálcico en forma de nódulos y/o rizoconcrecciones de caliza.

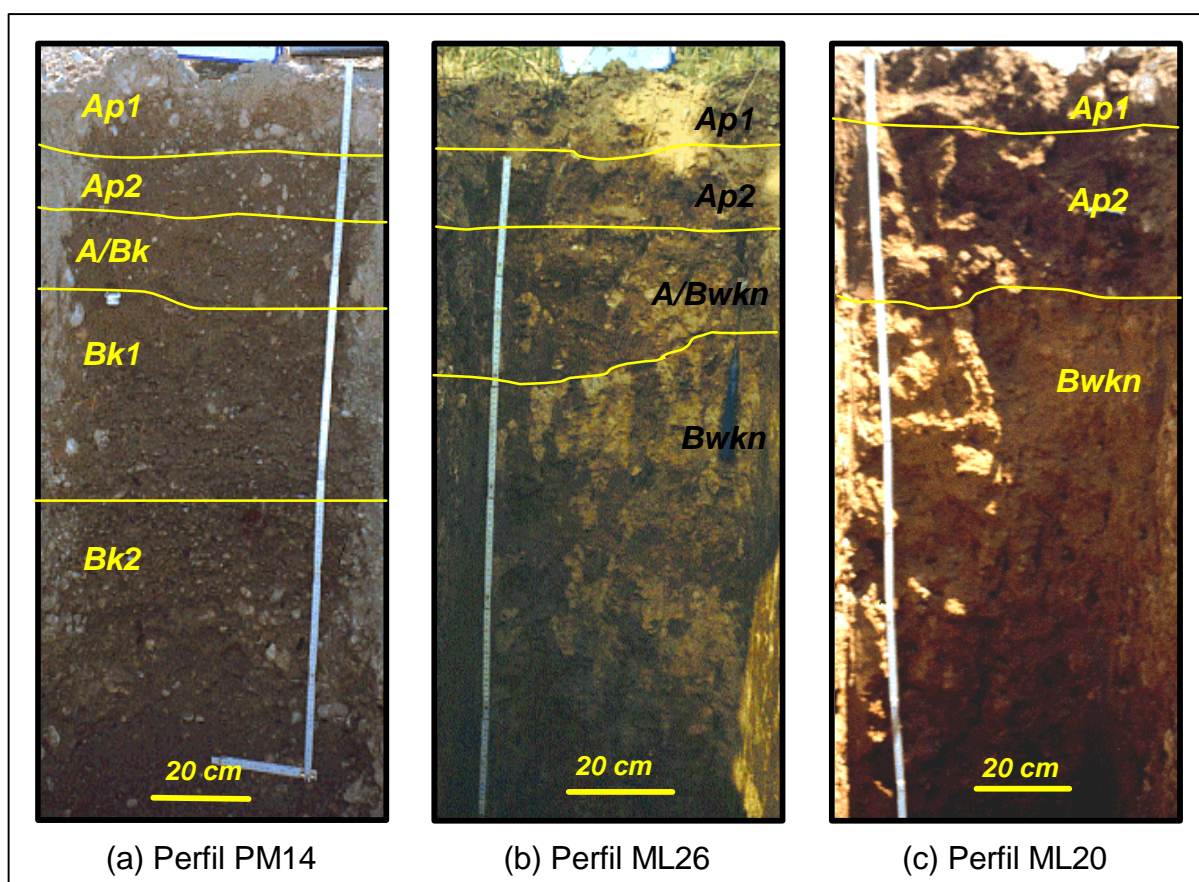


Figura 3.8. (a) Perfil PM14 (Xerochrept calcixeróllico, franca gruesa, mezclada, térmica) en Can Bonastre (Masquefa), (b) perfil ML26 (Xerochrept calcixeróllico, limosa fina, carbonática, térmica) en Monistrol d’Anoia, y (c) perfil ML20 (Xerochrept calcixeróllico, franca gruesa, carbonática, térmica) en Can Prats (Sant Llorenç d’Hortons).

En estas vertientes complejas fuertemente inclinadas también son frecuentes los Xerochrepts calcixeróllicos de clases texturales limosa fina (Figura 3.8b) y franca gruesa (Figura 3.8c) y mineralogía carbonática. Estos suelos presentan un endopedión cálcico con acumulaciones de carbonato cálcico mayores del 40% en volumen, en forma de nódulos y rizoconcrecciones de caliza. Estos materiales están siendo progresivamente incorporados al horizonte superficial por laboreo, aunque también este hecho se ve influido por la

desaparición del horizonte A original por el efecto de la erosión. La incorporación de estos materiales al horizonte superficial produce un incremento de los contenidos de carbonato cálcico y, en el caso de que las acumulaciones sean en forma de rizoconcrecciones, también un incremento del contenido de elementos gruesos en superficie (Figura 3.9).

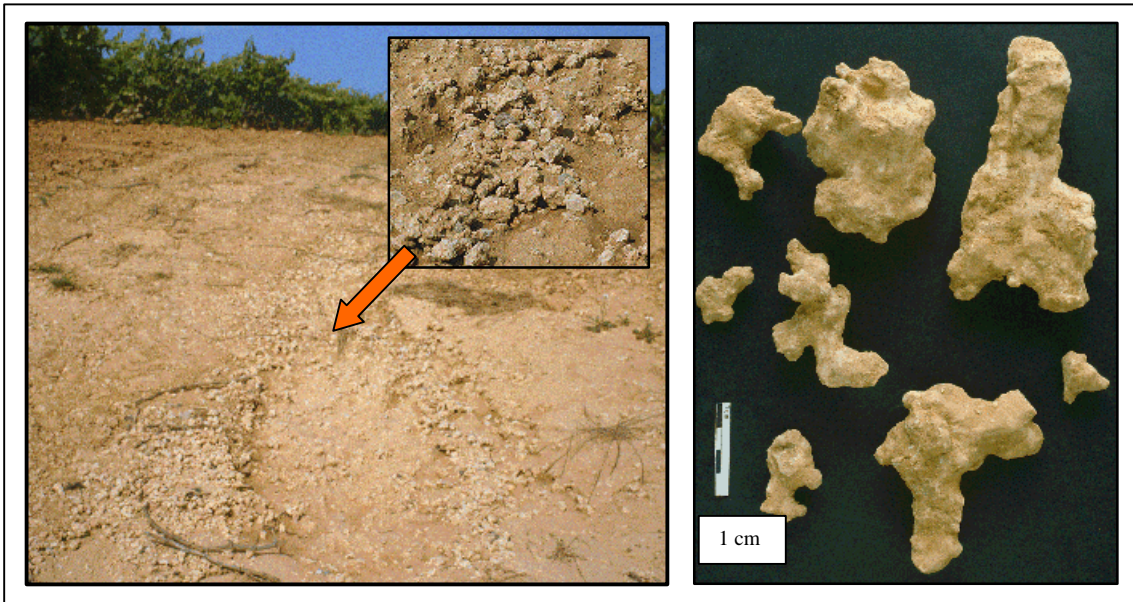


Figura 3.9. Incremento de la pedregosidad superficial (rizoconcrecciones de caliza) como consecuencia de la incorporación en superficie de endopediones cálcicos de Xerochrepts calcixeróllicos con mineralogía carbonática, y detalle de las rizoconcrecciones de caliza.

En algunas de las vertientes complejas fuertemente inclinadas que rodean las divisorias redondeadas aparecen Xerochrepts fluvénticos, de clase textural limosa fina, caracterizados por la presencia de un endopedión cálcico. El hecho de presentar los suelos una distribución irregular de materia orgánica en profundidad evidencia el origen coluvial de los materiales en que se han desarrollado estos suelos. En algunos casos, y debido fundamentalmente a la erosión, la profundidad de estos suelos no supera actualmente los 100-120 cm (Figura 3.10a).

Otro gran grupo de suelos que se desarrolla en calcilutitas y areniscas incoherentes de las vertientes complejas fuertemente inclinadas o colinadas (pendiente 10-20%) del área de vertientes y barrancos son los Xerorthents típicos, de clases texturales francas o limosas (Figura 3.10 b y c). Estos suelos son poco profundos y también suelen presentar evidencias de mezcla de materiales (restos de calcilutitas y areniscas) en el horizonte superficial por el efecto del laboreo. Esto empobrece el horizonte A, con consecuencias negativas respecto a la productividad de estos suelos. Las calcilutitas subyacentes son no salinas, con contenidos de carbonato cálcico entre el 35 y 60%. También aparecen Xerochrepts calcixeróllicos, de clase textural limosa fina y mineralogía carbonática, en las zonas de menor pendiente.

Xerorthents típicos de clase textural franca y poco profundos también aparecen en vertientes moderadamente escarpadas a escarpadas (pendiente 20-30%), que conectan

algunas divisorias (con niveles residuales ya desaparecidos) con barrancos que disectan la unidad. En estas vertientes, al igual que en los escarpes de la unidad de pie de monte, también aparecen Xerochrepts calcixerólics de clase textural franca fina, moderadamente profundos en las zonas de menor pendiente.

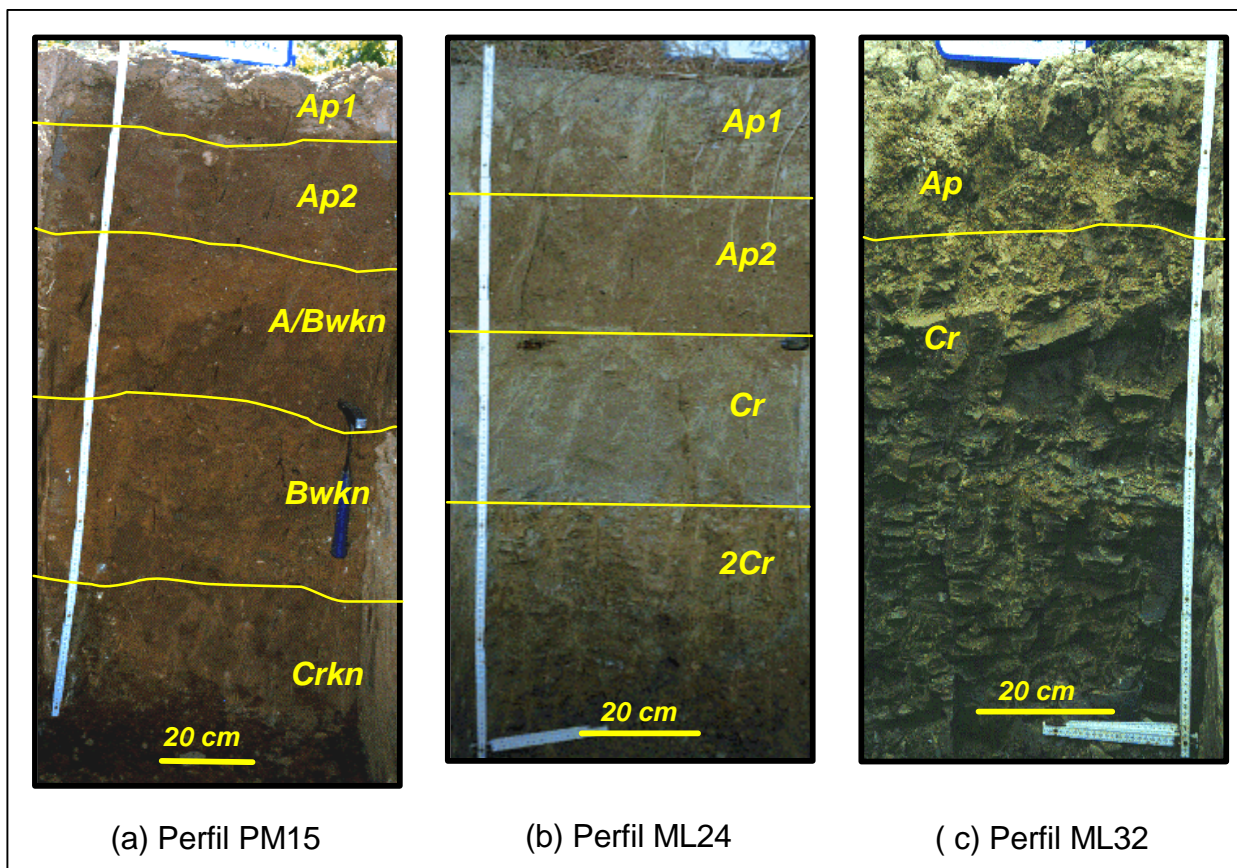


Figura 3.10. (a) Perfil PM15 (Xerochrept fluvéntico, limosa fina, mezclada, térmica), en La Grua (Piera). (b) perfil ML24 (Xerorthent típico, franca, mezclada (calcárea), térmica, superficial), en Can Prats (Sant Llorenç d’Hortons), y (c) perfil ML32 (Xerorthent típico, limosa, mezclada (calcárea), térmica, superficial), en Can Atalaya (Gelida).

La Tabla 3.7 resume el modelo de suelo-paisaje descrito para el área de vertientes y barrancos.

Tabla 3.7. Modelo de suelo-paisaje del área de vertientes y barrancos.

| Geformas | Material originario | Suelos |
|---|--|--|
| Divisorias redondeadas (crestas), (pendiente 5-15%) | Depósitos detríticos finos con gravas poligénicas | Xerochrepts petrocálcicos , franca gruesa, mezclada, térmica. Xerochrepts petrocálcicos , franca, mezclada, térmica, superficial. Xerochrepts calcixerólicos , limosa gruesa, carbonática, térmica. |
| | Depósitos detríticos finos con gravas poligénicas y calcilutitas | Xerochrepts calcixerólicos , arenosa, mezclada, térmica. Xerorthents típicos , limosa, mezclada (calcárea), térmica, superficial. |
| Vertientes complejas, fuertemente inclinadas, (pendiente 5-15%) | Depósitos detríticos finos y calcilutitas | Xerochrepts fluvénticos , limosa fina, mezclada, térmica. Xerochrepts calcixerólicos , limosa fina, carbonática, térmica. Xerochrepts calcixerólicos , franca gruesa, mezclada, térmica. Xerochrepts calcixerólicos , franca fina, mezclada, térmica. Xerorthents típicos , limosa, mezclada (calcárea), térmica, superficial. |
| Vertientes complejas, de fuertemente inclinadas a colinadas, (pendiente 10-20%) | Calcilutitas y areniscas | Xerorthents típicos , limosa, mezclada (calcárea), térmica, superficial. Xerorthents típicos , franca, mezclada (calcárea), térmica, superficial. |
| | Depósitos detríticos finos y calcilutitas | Xerochrepts fluvénticos , limosa fina, mezclada, térmica, (prof. 100-150 cm). Xerochrepts calcixerólicos , franca gruesa, mezclada, térmica. Xerochrepts calcixerólicos , franca gruesa, mezclada, térmica, (prof. 50-100 cm). Xerochrepts calcixerólicos , limosa fina, carbonática, térmica, (prof. 100-150 cm). Xerochrepts calcixerólicos , franca gruesa, carbonática, térmica. Xerochrepts calcixerólicos , franca fina, mezclada, térmica. Xerofluents típicos , limosa fina, mezclada (calcárea), térmica. Xerorthents típicos , limosa, mezclada (calcárea), térmica, superficial. |
| Vertientes complejas colinadas, (pendiente 15-20%) | Calcilutitas y areniscas | Xerorthents típicos , franca, mezclada (calcárea), térmica, superficial. |
| | Depósitos detríticos finos y calcilutitas | Xerochrepts calcixerólicos , limosa fina, carbonática, térmica. Xerorthents típicos , limosa, mezclada (calcárea), térmica, superficial. |
| Vertientes, de moderadamente escarpadas a escarpadas, (pendiente 20-30%) | Depósitos detríticos finos y calcilutitas | Xerochrepts calcixerólicos , franca fina, mezclada, térmica, (prof. 50-100 cm). Xerorthents típicos , franca, mezclada (calcárea), térmica, superficial. |

3.3.3.4. Suelos del área de relieve suavemente ondulado

Los materiales originarios de los suelos de esta unidad de paisaje son mayoritariamente calcilutitas y areniscas incoherentes, y materiales detríticos con gravas poligénicas de origen aluvial.

En las divisorias y en los segmentos superiores de las vertientes cóncavas moderadamente inclinadas circundantes, permanecen algunos residuos de conglomerados terciarios sin cementar y bancos de areniscas que se han comportado como materiales más resistentes a la erosión. En estos materiales se han desarrollado Xerochrepts calcixeróllicos de clases texturales franca gruesa (Figura 3.11b) y esquelética franca, y clase mineralógica carbonática. En algunas de las divisorias el nivel resistente ha desaparecido por efecto de la erosión, y actualmente afloran calcilitas, en las cuales se han desarrollado Xerorthents típicos, de clase textural franca y poco o muy poco profundos, y también Xerochrepts calcixeróllicos de clase textural franca fina y mineralogía mezclada (Figura 3.11a).

Xerorthents típicos y Xerochrepts calcixeróllicos también se alternan en las vertientes cóncavas, moderadamente escarpadas (pendiente 10-20%) que constituyen el escarpe de la divisoria de las cuencas del río Foix y del arroyo Romaní, y en algunas otras vertientes resultado de la incisión de la red de drenaje en los sedimentos terciarios que rellenan la zona sur del área de estudio. En ambos casos, los Xerochrepts calcixeróllicos tienen clase textural franca gruesa y mineralogía mezclada, con una profundidad entre 50-100 cm. No obstante, los suelos más frecuentes en estas geoformas son los Xerorthents típicos, de clase textural franca, mineralogía mezclada (calcárea) y poco profundos, desarrollados en calcilitas (Figura 3.11c).

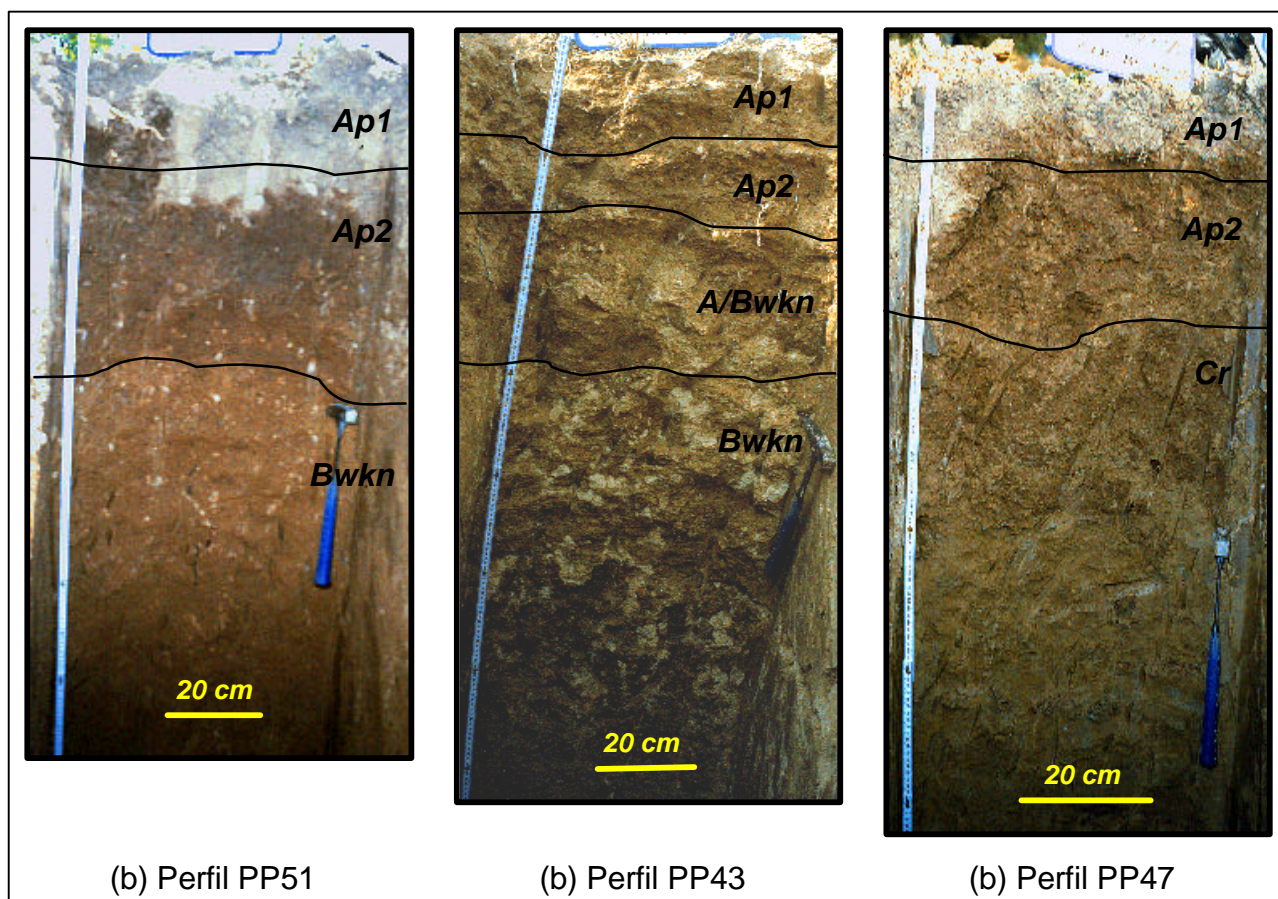


Figura 3.11. (a) Perfil PP51 (Xerochrept calcixeróllico, franca fina, mezclada, térmica), en Can Baldús (Santa Fe del Penedès), (b) perfil PP43 (Xerochrept calcixeróllico, franca gruesa, carbonática, térmica) en Torrelavit, y (c) perfil PP47 (Xerorthent típico, franca, mezclada (calcárea), superficial) en El Gorner (Pla del Penedès).

Los suelos de las vertientes cóncavas, moderada o fuertemente inclinadas (5-10% de pendiente), que conectan la parte inferior de las vertientes moderadamente escarpadas con la red de arroyos y barrancos, también presentan una alternancia de Xerorthents típicos de clase textural franca y poco profundos, y Xerochrepts calcixeróllicos de clases texturales franca fina y franca gruesa y mineralogía mezclada, que en algunos casos presentan profundidades entre 50-100 cm. En la parte inferior de estas vertientes, y en materiales detríticos finos de origen aluvial, se han descrito Xerochrepts acucios de clase textural franca gruesa y mineralogía mezclada (Figura 3.13a). Estos suelos presentan un endopediación cálcico con frecuentes acumulaciones secundarias de carbonato cálcico en forma de nódulos, y también evidencias de drenaje deficiente, como manchas de reducción con cromita igual a 2.

Los suelos de las vertientes en glacia y antiguas llanuras aluviales se han desarrollado en materiales detríticos con gravas poligénicas. Abundan los Xerochrepts calcixeróllicos de clase textural esquelética arenosa y mineralogía carbonática, desarrollados en los materiales más groseros (Figura 3.12a), y los Xerochrepts calcixeróllicos de clase textural franca gruesa y mineralogía mezclada, desarrollados en los materiales menos groseros (Figura 3.12b).

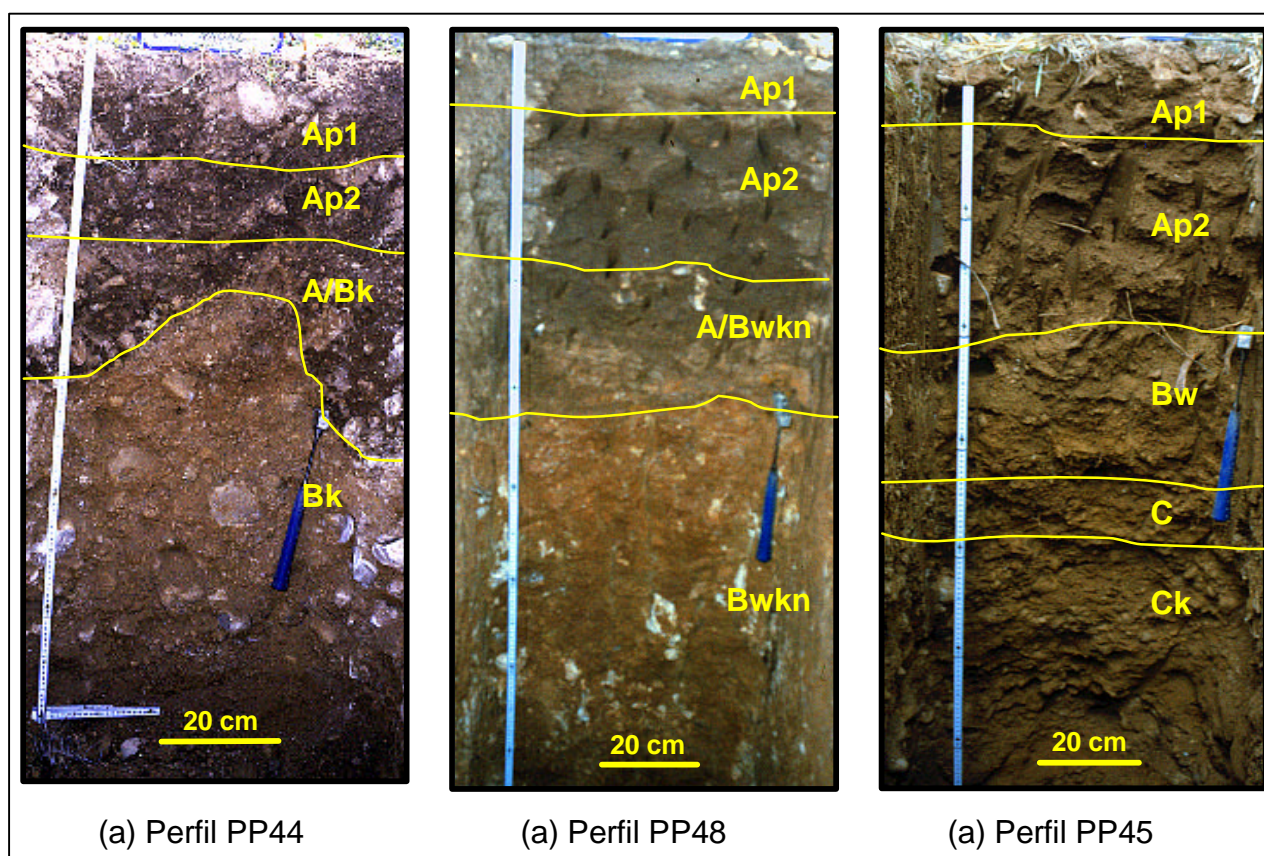


Figura 3.12. (a) Perfil PP44 (Xerochrept calcixeróllico, esquelética arenosa, carbonática, térmica) en Can Nadal (Torrelavit), (b) perfil PP48 (Xerochrept calcixeróllico, franca gruesa, mezclada, térmica) en El Gorner (Pla del Penedès), y (c) PP45 Xerofluvent típico, limosa fina, mezclada (calcárea), térmica) en Can Nadal (Torrelavit).

Estas geoformas drenan a la red principal de arroyos y barrancos a través de unos fondos donde se han desarrollado suelos muy profundos de texturas finas (Xerofluvents típicos de clase textural limosa fina y mineralogía mezclada (calcárea), Figura 3.12c). Actualmente estos fondos suelen presentar incisión de cárcavas, que se desarrollan por erosión remontante desde el desagüe en los barrancos y arroyos.

En los fondos de mayor amplitud, que recogen el drenaje y los sedimentos de las vertientes en glacis adyacentes, se han desarrollado Xerochrepts fluvénticos de clase textural limosa fina y mineralogía mezclada. Estos suelos se caracterizan por una distribución irregular del contenido de materia orgánica en profundidad y por la presencia de un endopedión cálcico, con frecuentes acumulaciones secundarias de carbonato cálcico en forma de nódulos (Figura 3.13b).

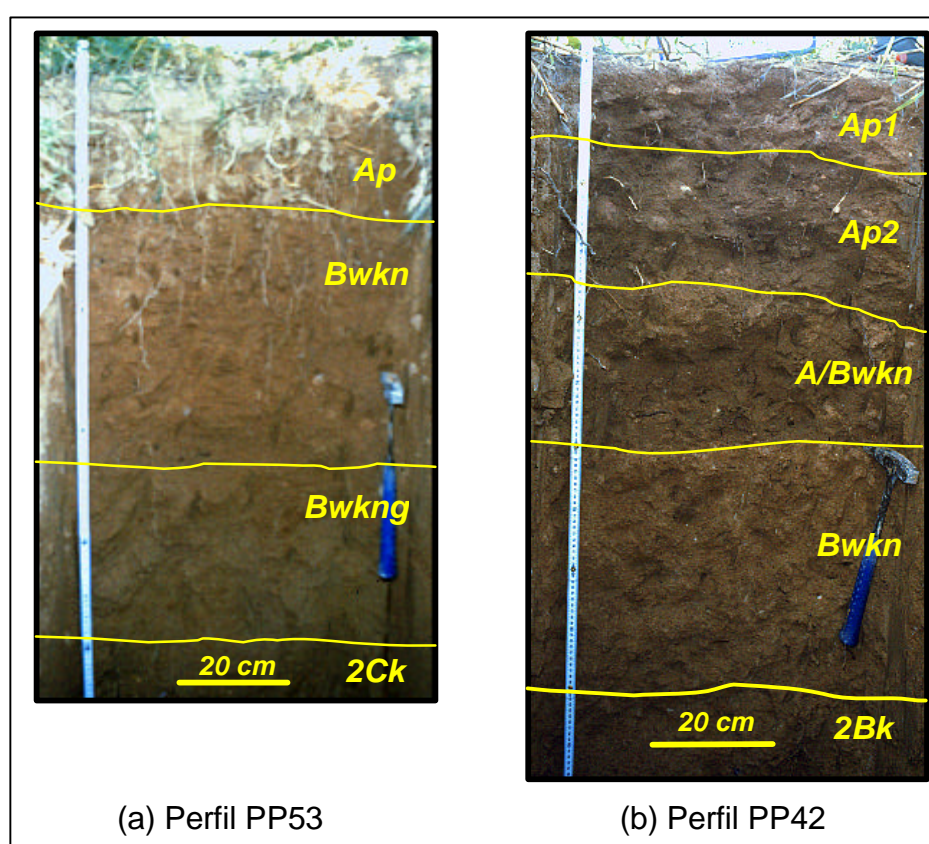


Figura 3.13. (a) Perfil PP53 (Xerochrept acuico, franca gruesa, mezclada, térmica) en El Pont (Santa Fe del Penedès), y (b) perfil PP42 (Xerochrept fluvéntico, limosa fina, mezclada, térmica) en Can Nadal (Torrelavit).

Como resumen de estas relaciones observadas entre suelos y geoformas, la Tabla 3.8 recoge el modelo de suelo-paisaje descrito para el área de relieve suavemente ondulado.

Tabla 3.8. Modelo de suelo-paisaje del área de relieve suavemente ondulado.

| Geoformas | Material originario | Suelos |
|--|---|--|
| Asociación de divisorias y vertientes cóncavas moderadamente inclinadas, (pendiente 5-10%) | Calcilutitas y conglomerados sin cementar | Xerochrepts calcixerólicos , franca fina, mezclada, térmica. Xerochrepts calcixerólicos , franca gruesa, carbonática, térmica. Xerochrepts calcixerólicos , esquelética arenosa, carbonática, térmica. Xerorthents típicos , franca, mezclada (calcárea), térmica, superficial. |
| Vertientes cóncavas, suavemente inclinadas, (pendiente 1-5%) | Calcilutitas | Xerorthents típicos , franca, mezclada (calcárea), superficial. |
| Vertientes en glacis y llanuras aluviales, (pendiente 1-10%) | Depósitos detríticos con gravas poligénicas | Xerochrepts calcixerólicos , esquelética arenosa, carbonática, térmica. Xerochrepts calcixerólicos , franca gruesa, mezclada, térmica. Xerofluents típicos , limosa fina, mezclada (calcárea), térmica. Xerofluents típicos , franca gruesa, mezclada (calcárea), térmica.. |
| Vertientes, de moderada a fuertemente inclinadas, (pendiente 5-10%) | Calcilutitas | Xerochrepts calcixerólicos , franca fina, mezclada, térmica, (prof. 50-100 cm). Xerorthents típicos , franca, mezclada (calcárea), térmica, superficial. |
| | Depósitos detríticos finos | Xerochrepts calcixerólicos , franca fina, mezclada, térmica. Xerochrepts calcixerólicos , franca gruesa, mezclada, térmica. Xerochrepts acucos , franca gruesa, mezclada, térmica. |
| Vertientes cóncavas, moderadamente escarpadas, (pendiente 10-20%) | Calcilutitas y conglomerados sin cementar | Xerochrepts calcixerólicos , franca gruesa, mezclada, térmica, (prof. 50-100 cm). Xerorthents típicos , franca, mezclada (calcárea), térmica, superficial. |
| Fondos, (pendiente 5-10%) | Depósitos detríticos finos | Xerochrepts fluvénticos limosa fina, mezclada, térmica. |

3.3.3.5. Suelos del área de niveles aluviales recientes

Los suelos de esta unidad de paisaje se han desarrollado en depósitos detríticos finos y con gravas que han sido aportadas por los cauces principales que drenan la depresión.

En las terrazas más antiguas de los ríos principales (Anoia y Riudevittles) se han formado Xerochrepts petrocálcicos de clase textural franca y poco profundos (Figura 3.14a). En las terrazas del primer nivel los suelos desarrollados están menos evolucionados. Se alternan Xerochrepts calcixerólicos de clase textural esquelética franca y mineralogía carbonática, desarrollados en depósitos detríticos con gravas (Figura 3.14b), y Xerochrepts fluvénticos de clase textural limosa fina y mineralogía mezclada (calcárea), desarrollados en las pasadas de materiales finos. Estos últimos presentan un endopedión cálcico con frecuentes acumulaciones secundarias de carbonato cálcico en forma de nódulos y rizoconcrecciones de caliza.

En las llanuras aluviales, en los depósitos finos, se encuentran los suelos menos evolucionados, que pertenecen a las clases Xerofluents típicos de texturas limosas finas y francas gruesas, y mineralogía mezclada (calcárea) (Figura 3.14c). Estos son suelos muy profundos que presentan distribución irregular de la materia orgánica en profundidad.

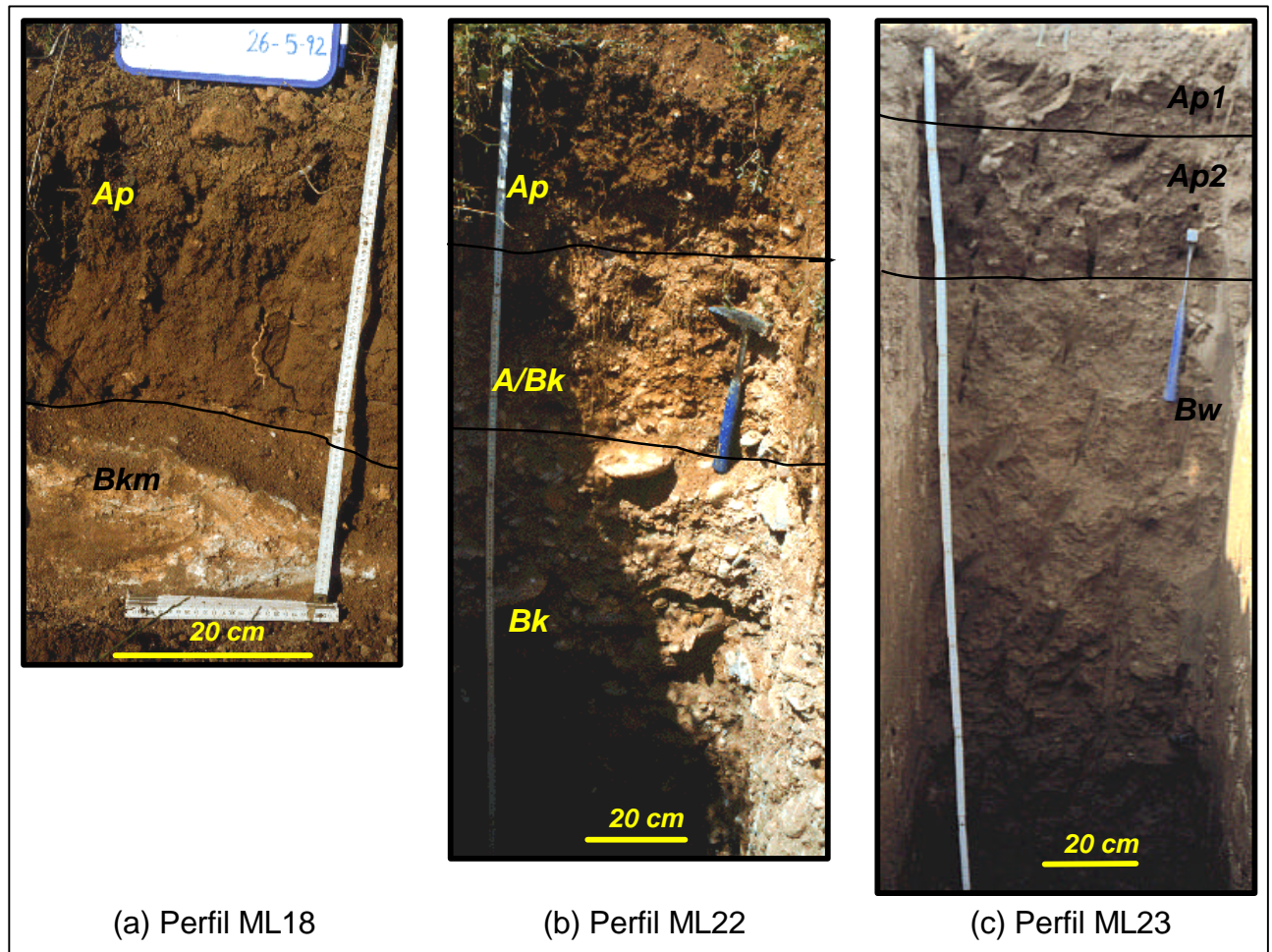


Figura 3.14. (a) Perfil ML18 (Xerochrept petrocálcico, franca, mezclada, térmica, superficial) en Monistrol d’Anoia, (b) perfil ML22 (Xerochrept calcixeróllico, esquelética franca, carbonática, térmica) en Monistrol d’Anoia, y (c) perfil ML23 (Xerofluvent típico, limosa fina, mezclada (calcárea), térmica) en Monistrol d’Anoia.

La Tabla 3.9 resume el modelo de suelo-paisaje descrito para el área de niveles aluviales recientes.

Tabla 3.9. Modelo de suelo-paisaje del área de niveles aluviales recientes.

| Geoformas | Material originario | Suelos |
|--|---|--|
| Red principal | Depósitos detríticos finos | Xerofluvents típicos , limosa fina, mezclada (calcárea), térmica. |
| Red secundaria | | Xerofluvents típicos , franca gruesa, mezclada (calcárea), térmica. |
| Asociación de llanuras aluviales y terrazas bajas, (red secundaria) | Depósitos detríticos con gravas de rocas metamórficas | Xerochrepts calcixerólicos , franca fina, mezclada, térmica. Xerochrepts calcixerólicos , esquelética franca, mezclada, térmica. |
| Terrazas bajas, (red principal) | Depósitos detríticos finos con gravas poligénicas | Xerochrepts fluvénticos , limosa fina, mezclada, térmica. Xerochrepts calcixerólicos , esquelético arenosa, carbonática, térmica. |
| Terrazas medias, (red principal) | Depósitos detríticos finos con gravas poligénicas | Xerochrepts petrocálicos , franca, mezclada, térmica, superficial. |
| Asociación de terrazas y glaciares entre niveles de terrazas, (red secundaria) | Depósitos detríticos con gravas de rocas metamórficas | Xerochrepts calcixerólicos , franca fina, mezclada, térmica. Xerochrepts calcixerólicos , esquelética franca, mezclada, térmica. |

3.3.4. Sistema de información de suelos

El sistema de información de suelos (SIS) desarrollado se compone de: a) la base de datos espacial, que recoge la información geométrica y temática o descriptiva del patrón de distribución y de las características de los suelos, y b) los procedimientos de consulta para el análisis de la información, que en este caso se basan en la utilización de lenguaje de consulta estructurado SQL en la base de datos relacional diseñada.

3.3.4.1. Base de datos espacial del SIS

3.3.4.1.1. Unidades taxonómicas

Las familias de suelos descritas en el área de estudio (Tabla 3.4) sirvieron como base para la definición de las unidades taxonómicas de la base de datos espacial de suelos del Alt Penedès – Anoia, constituidas por fases de familias.

El hecho de trabajar con la familia de suelos como base de la unidad taxonómica presentó problemas a la hora de la elección de un perfil tipo que representase a la unidad. La familia es un taxon que fue creado para agrupar series con características similares. Así, dentro de una familia se pudieron distinguir varios perfiles tipo con características diferenciales que corresponderían a distintas series.

Estas características diferenciales en perfiles tipo de una misma familia, que principalmente fueron debidas a la profundidad efectiva del suelo y propiedades relacionadas con ella, fueron recogidas a nivel de fase. De cara al diseño de la base de datos de suelos esto se resolvió considerando más de un perfil modal para las familias que presentaban estas características diferenciales, de forma que dos perfiles modales de una misma familia varíen en las características distintivas de profundidad del suelo y de las propiedades de los horizontes implicados en este incremento o disminución de la profundidad del suelo.

No se consideró el estado erosionado del suelo a nivel de fase de familia por la dificultad para estimar el grado de erosión. Según Wambeke y Forbes (1985), este grado se determina comparando las propiedades del suelo no erosionado en un sitio y estado de uso comparables a las del suelo erosionado. Mediante esta comparación se pueden estimar las pérdidas de partes de horizontes u horizontes enteros. En el Alt Penedès-Anoia, el hecho de realizar labores de desfonde hasta 70-80 cm, previos a la plantación de la viña, hace que los horizontes superficiales sean normalmente una mezcla de los horizontes A/B o A/C, observándose propiedades de horizontes subsuperficiales en superficie. Esto puede dar lugar a error al considerar estas propiedades signo de la pérdida de horizontes superficiales, hecho que también influye en la pérdida de horizontes superficiales en esta área de estudio.

El Anejo 1 recoge la descripción de las 22 familias de suelos descritas en el área de estudio, que componen las unidades taxonómicas de la base de datos de suelos, así como las características principales de los perfiles modales, que recogen el intervalo de variación de las propiedades de los perfiles tipo estudiados de cada familia.

3.3.4.1.2. Unidades cartográficas y clave de la base de datos de suelos

Como resultado del análisis fointerpretativo y de prospección dirigido a la representación del patrón de distribución espacial de los suelos en el área de estudio se distinguieron 58 unidades cartográficas, 54 de las cuales corresponden a suelos y 4 a áreas misceláneas. El 50% de las unidades cartográficas de suelos son consociaciones y el otro 50% son asociaciones (30%) y complejos (20%). Este número tan alto de asociaciones y de complejos de familias suelos es reflejo de la alta variabilidad espacial que presentan los suelos del área de estudio, la cual se relaciona con la complejidad de las formas del relieve.

La distribución, forma y localización de las diferentes delineaciones que componen las unidades cartográficas de suelos se presentan gráficamente en la Figura 3.15.

En la Tabla 3.10 se presenta la clave o leyenda de las unidades cartográficas de la base de datos de suelos. Es una leyenda con entrada geomorfológica. Esta clave, que facilita al usuario una lectura resumida de la información de suelos contenida en el SIS desarrollado. Recoge los tres niveles categóricos inferiores del sistema de clasificación de geoformas de Zinck (1988): paisaje, relieve y litología del material originario. En la base de datos digital también queda recogida información sobre el nivel inferior, la forma del terreno, en aquellos casos de asociaciones de suelos en que se ha podido observar el patrón de distribución de los suelos en la asociación de formas que componen la unidad.

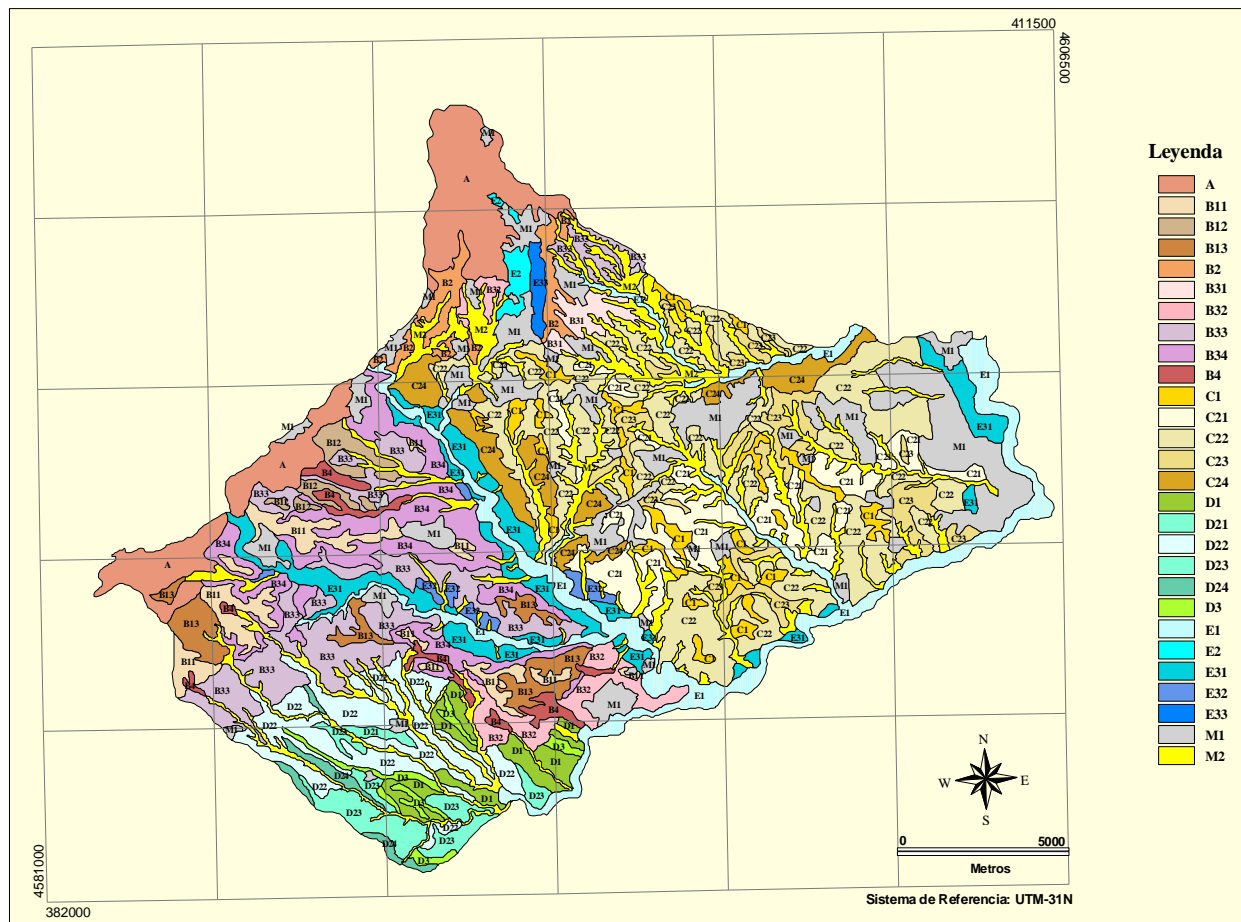


Figura 2.6. Mapa de geofomas del Alt Penedès - Anoia. Escala original 1:50.000. (Ver leyenda con la descripción de las geofomas en la Tabla 2.6). (Mapa elaborado a partir de la fotointerpretación de fotografías aéreas y posterior georeferenciación y digitalización vectorial en ArcInfo).

Tabla 3.10. Clave de la base de datos de suelos del Alt Penedès - Anoia. (Representación simplificada de la información de suelos contenida en la base de datos del sistema de información de suelos).

| Unidad de Paisaje | Geoformas | Material originario | Suelos | Código unidad cartográfica |
|---|---|--|--|----------------------------|
| Montaña (Sierra Prelitoral) | Vertientes escarpadas o muy escarpadas, (pendiente >20%) | Esquistos y cuarcitas | Xerorthents líticos , franca, mezclada (no ácida). Fase de textura franca. | Aa |
| | | Rocas calizas y dolomías | Xerorthents líticos , franca, mezclada (calcárea). Fase de textura franca. | Ab |
| Pie de monte | Plataformas residuales poco disectadas, elevadas 140-160 m sobre los cauces principales del área, (pendiente 5-15%) | Depósitos detríticos con gravas poligénicas | Xerochrepts petrocálcicos , franca, mezclada, superficial. Fase de textura franca. | Ba1 |
| | Plataformas residuales poco disectadas, elevadas 90-110 m sobre los cauces principales del área, (pendiente 5-15%) | Depósitos detríticos con gravas poligénicas | Xerochrepts petrocálcicos , franca, mezclada, superficial. Fase de textura franco arenosa. | Ba2 |
| | Plataformas residuales disectadas, elevadas 140-160 m sobre los cauces principales del área, (pendiente 5-15%) | Depósitos detríticos finos con gravas poligénicas | Asociación de Xerochrepts petrocálcicos , franca, mezclada, superficial y Xerochrepts fluvénticos limosa fina, mezclada. Fase de textura franca. | Ba3 |
| | Glacis (pendiente 5-15%) | Depósitos detríticos finos con gravas de rocas metamórficas | Complejo de Palexeralfs petrocálcicos , arcillosa fina, mezclada y Haploxeralfs típicos , esquelética franca, mezclada. Fase de textura franco arcillosa. | Bb1 |
| | | | Complejo de Haploxeralfs típicos , esquelética franca, mezclada y Xerochrepts calcixeróllicos , esquelética franca, mezclada. Fase de textura franco limosa. | Bb2 |
| | | | Xerochrepts calcixeróllicos , franca fina, carbonática. Fase de textura franca. | Bb3 |
| | Vertientes, de suave a moderadamente inclinadas, (pendiente 1-10%) | Depósitos detríticos finos y calcilitas | Asociación de Xerochrepts calcixeróllicos , franca fina mezclada y Xerofluvents típicos , limosa fina, mezclada(calcárea). Fase de textura franco limosa. | Bc1 |
| | Vertientes, moderadamente inclinadas, (pendiente 5-15%) | Depósitos detríticos con gravas de rocas metamórficas | Xerochrepts típicos , franca gruesa, mezclada. Fase de textura franco arenosa. | Bc2 |
| Depósitos detríticos finos | | Xerochrepts calcixeróllicos , limosa fina, mezclada. Fase de textura franca. | Bc3 | |
| Vertientes complejas, fuertemente inclinadas, (pendiente 5-15%) | Calcilitas | Xerorthents típicos , Franca, mezclada (calcárea), superficial. Fase de textura franca. | Bc4 | |

Tabla 3.10. Clave de la base de datos de suelos (continuación).

| Unidad de Paisaje | Geoformas | Material originario | Suelos | Código unidad cartográfica |
|--------------------------------|--|---|--|----------------------------|
| Pie de monte | Vertientes complejas, fuertemente inclinadas, (pendiente 5-15%) | Depósitos detríticos finos con gravas poligénicas | Asociación de Xerorthents típicos , franca, mezclada (calcárea), superficial y Xerochrepts petrocálcicos , franca, mezclada, superficial. Fase de textura franca. | Bc5 |
| | | | Asociación de Xerochrepts petrocálcicos , franca gruesa, mezclada y Xerochrepts fluvénticos limosa fina, mezclada (calcárea). Fase de textura franco limosa. | Bc6 |
| | | | Asociación de Xerochrepts calcixeróllicos , limosa gruesa, carbonática y Xerochrepts petrocálcicos , franca, mezclada, superficial. Fase de textura franca. | Bc7 |
| | | Depósitos detríticos finos y calcilutitas | Asociación de Xerochrepts calcixeróllicos , franca gruesa, mezclada, (prof. 100-150 cm) y Xerochrepts calcixeróllicos , franca gruesa, carbonática. Fase de textura franca. | Bc8 |
| | Vertientes, de moderadamente escarpadas a escarpadas, (pendiente 20-30%) | Depósitos detríticos finos y calcilutitas | Complejo de Xerorthents típicos , franca, mezclada (calcárea), superficial y Xerochrepts calcixeróllicos , franca fina, mezclada, (prof. 50-100 cm). Fase de textura franca. | Bc9 |
| Fondos, (pendiente 5-15%) | Depósitos detríticos finos | Xerochrepts fluvénticos limosa fina, mezclada. Fase de textura franca. | Bd | |
| Área de vertientes y barrancos | Divisorias redondeadas (crestas), (pendiente 5-15%) | Depósitos detríticos finos con gravas poligénicas | Complejo de Xerochrepts calcixeróllicos , limosa gruesa, carbonática, y Xerochrepts petrocálcicos , franca gruesa, mezclada. Fase de textura franco limosa. | Ca1 |
| | | | Xerochrepts petrocálcicos , franca, mezclada, superficial. Fase de textura franca. | Ca2 |
| | | Depósitos detríticos finos con gravas poligénicas y calcilutitas | Complejo de Xerochrepts calcixeróllicos , arenosa, mezclada y Xerorthents típicos , limosa, mezclada (calcárea), superficial. Fase de textura franca. | Ca3 |
| | Vertientes complejas, fuertemente inclinadas, (pendiente 5-15%) | Depósitos detríticos finos y calcilutitas | Xerochrepts calcixeróllicos , limosa fina, carbonática. Fase de textura franca. | Cb1 |
| | | | Complejo de Xerorthents típicos , limosa, mezclada (calcárea), superficial y Xerochrepts calcixeróllicos , franca gruesa, mezclada. Fase de textura franco limosa. | Cb2 |
| | | | Complejo de Xerochrepts calcixeróllicos , franca fina, mezclada y Xerochrepts calcixeróllicos , limosa fina, carbonática. Fase de textura franca. | Cb3 |
| | | | Xerochrepts fluvénticos limosa fina, mezclada (calcárea). Fase de textura franco arcillo limosa. | Cb4 |

Tabla 3.10. Clave de la base de datos de suelos (continuación).

| Unidad de Paisaje | Geoformas | Material originario | Suelos | Código unidad cartográfica |
|--------------------------------|---|--|--|--|
| Área de vertientes y barrancos | Vertientes complejas, de fuertemente inclinadas a colinadas, (pendiente 10-20%) | Calcilutitas y areniscas | Xerorthents típicos , limosa, mezclada (calcárea), superficial. Fase de textura franco limosa. | Cb5 |
| | | | Xerorthents típicos , franca, mezclada (calcárea), superficial. Fase de textura franca. | Cb6 |
| | | Depósitos detríticos finos y calcilutitas | Complejo de Xerorthents típicos , limosa, mezclada (calcárea), superficial y Xerochrepts calcixeróllicos , franca gruesa, mezclada. Fase de textura franca. | Cb7 |
| | | | Xerochrepts calcixeróllicos , limosa fina, carbonática. Fase de textura franca, profundidad 100-150 cm. | Cb8 |
| | | | Asociación de Xerochrepts calcixeróllicos , franca gruesa, mezclada, (prof. 50-100 cm) y Xerochrepts calcixeróllicos , franca gruesa, carbonática. Fase de textura franca. | Cb9 |
| | | | Xerochrepts fluvénticos limosa fina, mezclada. Fases de textura franca, profundidad 100-150 cm. | Cb10 |
| | | | Asociación de Xerochrepts calcixeróllicos , franca fina, mezclada y Xerofluvents típicos , limosa fina, mezclada (calcárea). Fase de textura franco limosa. | Cb11 |
| | Vertientes complejas, colinadas, (pendiente 15-20%) | Calcilutitas y areniscas | Xerorthents típicos , franca, mezclada (calcárea), superficial. Fase de textura franco limosa. | Cb12 |
| | | Depósitos detríticos finos y calcilutitas | Asociación de Xerochrepts calcixeróllicos , limosa fina, carbonática y Xerorthents típicos , limosa, mezclada (calcárea), superficial. Fase de textura franco arcillo limosa. | Cb13 |
| | Vertientes, de moderadamente escarpadas a escarpadas, (pendiente 20-30%) | Depósitos detríticos finos y calcilutitas | Complejo de Xerorthents típicos , franca, mezclada (calcárea), superficial y Xerochrepts calcixeróllicos , franca fina, mezclada, (prof. 50-100 cm). Fase de textura franca. | Cb14 |
| | Área de relieve suavemente ondulado (Pla del Penedès) | Asociación de divisorias y vertientes cóncavas moderadamente inclinadas, (pendiente 5-10%) | Calcilutitas y conglomerados sin cementar | Xerorthents típicos , franca, mezclada (calcárea), superficial. Fase de textura franco arenosa. |
| | | | Asociación de Xerochrepts calcixeróllicos , franca fina, mezclada, Xerochrepts calcixeróllicos , franca gruesa, carbonática y Xerochrepts calcixeróllicos , esquelética arenosa, carbonática. Fase de textura franca. | Da2 |

Tabla 3.10. Clave de la base de datos de suelos (continuación).

| Unidad de Paisaje | Geoformas | | Material originario | Suelos | Código unidad cartográfica |
|---|---|----------------------------|---|--|----------------------------|
| Área de relieve suavemente ondulado (Pla del Penedès) | Vertientes cóncavas, suavemente inclinadas, (pendiente 1-5%) | | Calcilutitas | Xerorthents típicos , franca, mezclada (calcárea), superficial. Fase de textura franco limosa. | Db1 |
| | Vertientes en glacis y llanuras aluviales, (pendiente 1-10%) | | Depósitos detríticos con gravas poligénicas | Asociación de Xerochrepts calcixeróllicos , esquelética arenosa, carbonática y Xerofluvents típicos , limosa fina, mezclada (calcárea). Fase de textura franca. | Db2 |
| | | | | Complejo de Xerochrepts calcixeróllicos , esquelética arenosa, carbonática, y Xerochrepts calcixeróllicos , franca gruesa, mezclada. Fase de textura franca. | Db3 |
| | | | | Xerochrepts calcixeróllicos , franca gruesa, mezclada. Fase de textura franca. | Db4 |
| | | | | Xerofluvents típicos , franca gruesa, mezclada (calcárea). Fase de textura franco limosa. | Db5 |
| | | | | Xerofluvents típicos , limosa fina, mezclada (calcárea). Fase de textura franco limosa. | Db6 |
| | | | | Vertientes, de moderada a fuertemente inclinadas, (pendiente 5-10%) | Calcilutitas |
| | | | Depósitos detríticos finos | Asociación de Xerochrepts calcixeróllicos , franca fina, mezclada y Xerochrepts acuicos , franca gruesa, mezclada. Fase de textura franca. | Db8 |
| | | | | Xerochrepts calcixeróllicos , franca gruesa, mezclada. Fase de textura franca. | Db9 |
| | Vertientes cóncavas, moderadamente escarpadas, (pendiente 20-45%) | | Calcilutitas y conglomerados sin cementar | Asociación de Xerorthents típicos , franca, mezclada (calcárea), superficial y Xerochrepts calcixeróllicos , franca gruesa, mezclada, (prof. 50-100 cm). Fase de textura franco arenosa. | Db10 |
| Fondos, (pendiente 5-10%) | | Depósitos detríticos finos | Xerochrepts fluvénticos limosa fina, mezclada. Textura franca. | Dc | |
| Área de niveles aluviales recientes | Llanuras aluviales | Red principal | Depósitos detríticos finos | Xerofluvents típicos , limosa fina, mezclada (calcárea). Fase de textura franca. | Ea1 |
| | | Red secundaria | | Xerofluvents típicos , franca gruesa, mezclada (calcárea). Fase de textura franco arenosa. | Ea2 |

Tabla 3.10. Clave de la base de datos de suelos (continuación).

| Unidad de Paisaje | Geoformas | Material originario | Suelos | Código unidad cartográfica |
|-------------------------------------|---|---|---|----------------------------|
| Área de niveles aluviales recientes | Asociación de llanuras aluviales y terrazas bajas, (red secundaria) | Depósitos detríticos con gravas de rocas metamórficas | Asociación de Xerochrepts calcixeróllicos , franca fina, mezclada y Xerochrepts calcixeróllicos , esquelética franca, mezclada. Fase de textura franco arenosa. | Eb |
| | Terrazas bajas, (red principal) | Depósitos detríticos finos con gravas poligénicas | Asociación de Xerochrepts fluvénticos limosa fina, mezclada y Xerochrepts calcixeróllicos , esquelético arenosa, carbonática. Fase de textura franca. | Ec1 |
| | Terrazas medias, (red principal) | Depósitos detríticos finos con gravas poligénicas | Xerochrepts petrocálcicos , franca, mezclada, superficial. Fase de textura franca. | Ec2 |
| | Asociación de terrazas y glacis entre niveles de terrazas, (red secundaria) | Depósitos detríticos con gravas de rocas metamórficas | Asociación de Xerochrepts calcixeróllicos , franca fina, mezclada y Xerochrepts calcixeróllicos , esquelética franca, mezclada. Fase de textura franca. | Ec3 |
| Áreas misceláneas | | | Áreas urbanas e industriales | Ma |
| | | | Áreas de extracción de áridos | Mb |
| | | | Áreas de cárcavas y barrancos | Mc |
| | | | Áreas de badlands | Md |

3.3.4.1.3. Modelo conceptual de la base de datos del SIS

La Figura 3.16 muestra el diagrama de Entidad-Relación que representa el modelo conceptual de la base de datos del sistema de información de suelos diseñado. En este diagrama se muestran las entidades que componen la base de datos (tablas), los identificadores clave y externos (que permiten establecer las relaciones entre tablas) y las relaciones. Este diagrama es la traducción de las bases y reglas de diseño de la base de datos consideradas

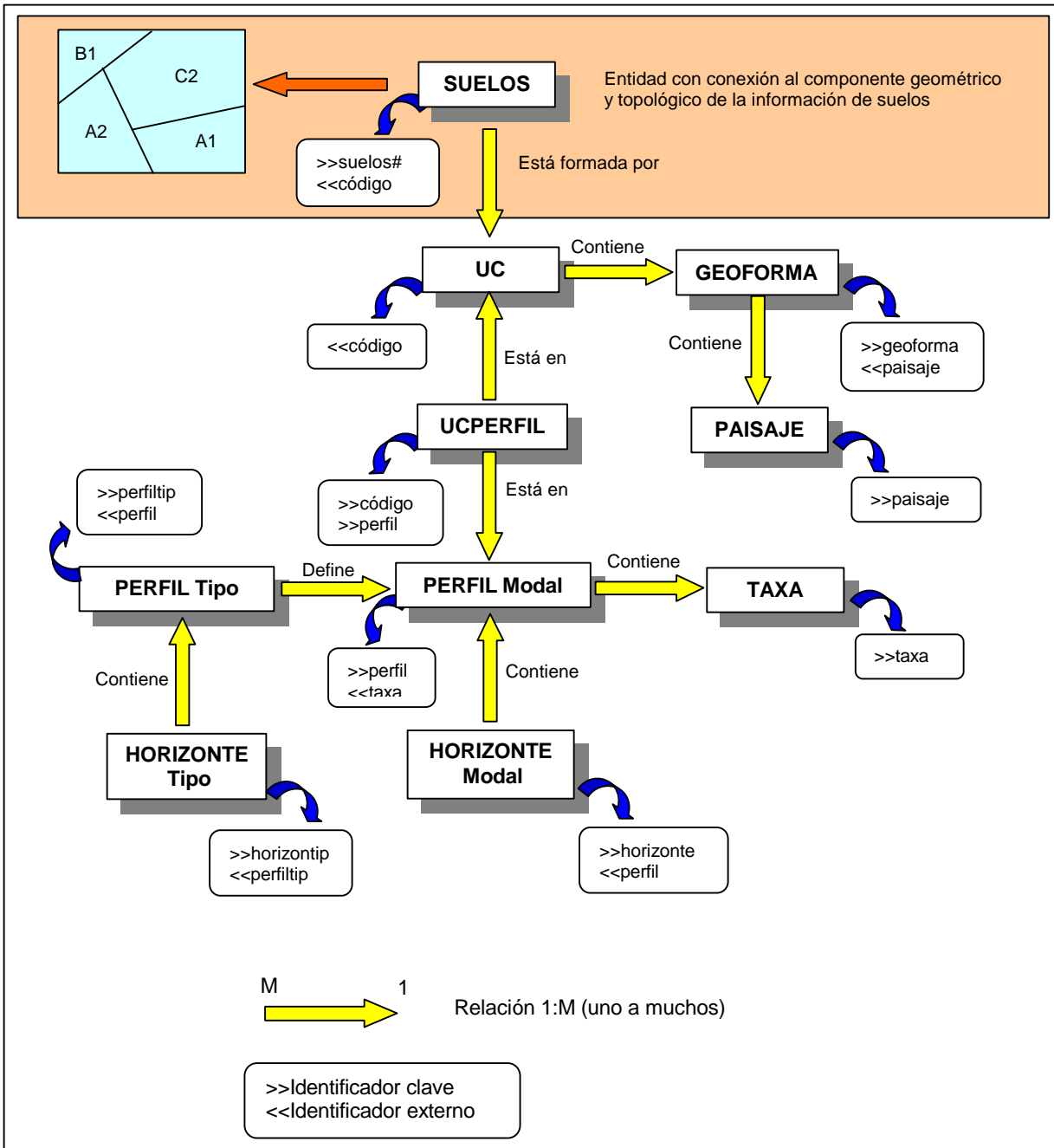


Figura 3.16. Diagrama de Entidad-Relación que representa el modelo conceptual de la base de datos de suelos. En el diagrama aparecen las entidades, los atributos o identificadores clave y externos y las relaciones.

Como relaciones del tipo muchos-a-muchos (M:N) no están permitidas en el modelo relacional, fue necesario crear una nueva tabla, denominada UCPERFIL, entre la entidad unidades cartográficas (UC) y la entidad perfiles modales (PERFIL Modal). De este modo aparecen dos relaciones del tipo (1:M).

El modelo conceptual de la base de datos de la Figura 3.16 refleja la relación entre los suelos y las geoformas como concepto fundamental de la estructura. La entidad que acoge esta relación es la unidad cartográfica (UC), que tiene un componente espacial (delineaciones de SUELOS) y un componente temático (clases de suelo y tipos de geoformas).

A diferencia de otros autores (Fernández i Rusinkiewicz 1993, Fernández *et al.* 1993), que distinguen diferentes entidades para los diferentes tipos de unidades cartográficas (consociaciones o complejos), lo cual supone una mayor complejidad de la base de datos, en el modelo aquí propuesto esta información se recoge en la propia entidad unidad cartográfica. La información sobre los componentes de suelos en una unidad cartográfica y su porcentaje se recoge en una tabla específica que contiene la relación entre unidades taxonómicas y unidades cartográficas.

Las unidades taxonómicas están representadas por los perfiles modales de las familias, que incluyen información sobre las fases de familia. Este enfoque permite reflejar el nivel de detalle cartográfico adquirido en campo, que no quedaría registrado si se hubiese considerado un solo perfil modal para cada familia.

La entidad perfil modal recoge el intervalo de variación de los perfiles tipo, con existencia real, que son representativos de las familias, y las características diferenciadoras dentro de ellas.

3.3.4.1.4. Modelo físico de la base de datos del SIS

El modelo físico de la base de datos fue diseñado e implementado de acuerdo al modelo conceptual presentado en la Figura 3.16. Se consideró la información de suelos relevante en aplicaciones de análisis de las propiedades de los suelos y de planificación de los usos de los suelos a escala regional. Este modelo interno es el que es operativo.

Consta de:

- a) Geometría del patrón de distribución, forma y localización de las delineaciones que componen las unidades cartográficas. Ha sido implementada en una estructura de datos vectorial topológica de la cual se muestra una representación cartográfica en la Figura 3.15.
- b) Descripción temática de la información de suelos, contenida en las tablas o entidades indicadas en el modelo conceptual. Se compone de las diferentes tablas indicadas en el modelo conceptual, con sus atributos (columnas de las tablas) y ocurrencias (filas de las tablas). La definición de estas tablas y la de sus atributos se recoge en el Anejo 2.

Ambos tipos de información, geometría y atributos, están conectados mediante el identificador de la entidad unidad cartográfica de suelos.

3.3.4.2. Procedimientos de consulta del SIS

Se han desarrollado diferentes procedimientos mediante lenguaje de consulta estructurado SQL que permiten analizar la información de suelos contenida en el SIS.

Las consultas programadas se recogen en el Anejo 3. Incluyen consultas simples a partir de una sola entidad o tabla y consultas complejas a partir de más de una entidad. Están orientadas al análisis global de las propiedades de los suelos, cuyos resultados se discuten en la sección 3.3.5.

Un ejemplo gráfico de los procedimientos de consulta desarrollados en el entorno del programa Access mediante el lenguaje SQL y la interfaz del usuario se muestra en la Figura 3.17.

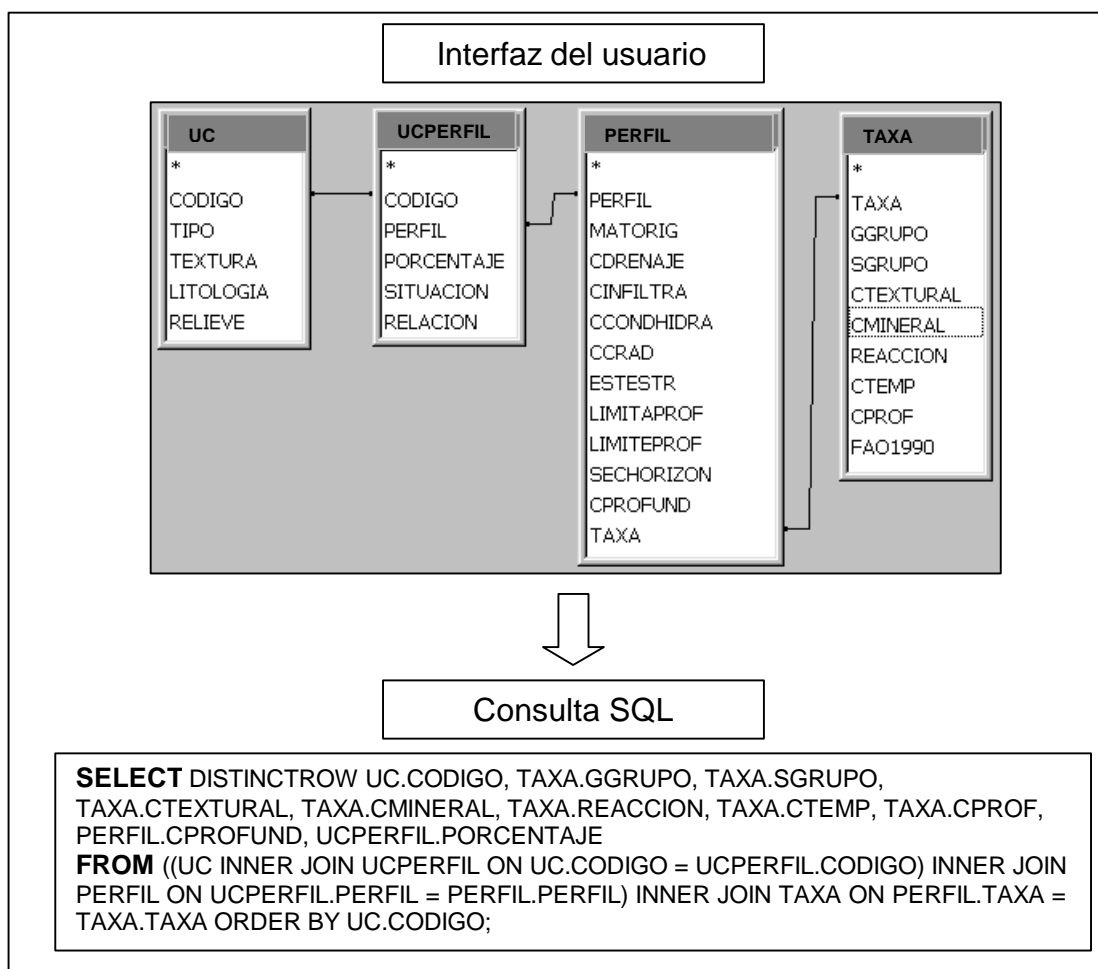


Figura 3.17. Ejemplo de consulta a la base de datos relacional del sistema de información de suelos mediante lenguaje SQL en el programa Access (Microsoft). El ejemplo muestra una consulta compleja para obtener la información relativa a la composición de las unidades cartográficas de la base de datos de suelos.

3.3.5. Procesos formadores y propiedades de los suelos del Alt Penedès – Anoia

A continuación se exponen y discuten los principales procesos formadores de los suelos que han sido identificados durante la prospección realizada en el Alt Penedès-Anoia y mediante el análisis de la información de suelos recogida en campo y laboratorio. Estos procesos han condicionado las propiedades y morfología de los suelos que se han desarrollado en el área de estudio. Dichos procesos se incluyen en los siguientes grupos:

- Procesos de adición al suelo relacionados con la materia orgánica y aportación de materiales.
- Pérdidas a partir de la superficie del suelo como la erosión laminar, por arroyaderos y por cárcavas.
- Transformaciones dentro del suelo como la meteorización y el desarrollo de estructura.
- Traslocaciones dentro del suelo como la iluviación de arcilla, calcificación y petrocalcificación (cementación).

3.3.5.1. Incremento de materia orgánica

La Tabla 3.11 recoge las frecuencias de las clases de los niveles de materia orgánica de los horizontes superficiales A analizados.

Tabla 3.11. Contenidos de materia orgánica de los horizontes Ap analizados. Criterio SINEDARES (C.B.D.S.A. 1983).

| Clase | Contenido de Materia Orgánica % | Núm. de muestras | Porcentaje % |
|---------------|---------------------------------|------------------|--------------|
| Inapreciable | <0.2 | 1 | 1.56 |
| Muy bajo | 0.2 – 1 | 41 | 64.06 |
| Bajo | 1 – 2 | 19 | 29.68 |
| Medio | 2 – 5 | 3 | 4.68 |
| Abundante | 5 - 10 | 0 | 0 |
| Muy abundante | > 10 | 0 | 0 |
| Total | | 64 | 100 |

De la Tabla 3.11 se deduce que el 93.74% de los horizontes Ap muestreados tiene un contenido de materia orgánica bajo o muy bajo. Teniendo en cuenta que el contenido que se puede considerar como normal en horizontes Ap es del 1-2% (Porta *et al.* 1994), la mayoría (65.62% de las muestras) presenta niveles por debajo de este intervalo.

Estos niveles tan pobres de materia orgánica pueden explicarse fundamentalmente por dos causas: el tipo de uso del suelo y la erosión.

El incremento de materia orgánica en los horizontes superficiales deriva de la presencia de vegetación. El principal tipo de uso de los suelos del área de estudio es agrícola, siendo el cultivo predominante la viña, que tras periodos de plantación que oscilan entre 20-30 años se alternan con cereales de invierno durante 4-6 años.

El cultivo de la viña no suele llevar aportes de materia orgánica en forma de estiércoles, salvo en el momento de la plantación (30-40 Tn ha⁻¹ o hasta 80 Tn ha⁻¹ en casos de

parcelas con movimientos de tierras). Tampoco, suelen incorporarse posteriormente los restos de poda triturados, sino que son apartados de la finca, quemados o utilizados para proteger el avance de las cárcavas.

Por otra parte, y a pesar de que el cereal mejora los niveles de materia orgánica del suelo, no se han encontrado diferencias significativas, mediante la prueba t-Student de separación de medias, entre los contenidos de materia orgánica de los horizontes superficiales en parcelas de viña respecto a los de parcelas de cereales. Este hecho es debido a la larga duración de la viña en relación a la duración del cereal en la rotación (3-5 años respecto a más de 20 de la viña). La Tabla 3.12 muestra los contenidos medios de materia orgánica en los horizontes A analizados, clasificados según los usos de los suelos descritos.

Tabla 3.12. Usos del suelo y niveles de materia orgánica en los horizontes Ap de los perfiles descritos en el área de estudio.

| Uso del suelo | Materia Orgánica (%) (contenido medio) | Desviación Estándar | Número de perfiles |
|---------------------|---|---------------------|--------------------|
| Olivar | 1 | 0 | 1 |
| Frutales | 1.2 | 0.28 | 3 |
| Cereales | 1.02 | 0.46 | 21 |
| Viña | 0.77 | 0.42 | 13 |
| Agrícola abandonado | 0.63 | 0.30 | 3 |

La erosión, particularmente la erosión laminar y por arroyaderos, es el otro factor que incide en los bajos niveles de materia orgánica por la remoción de la parte superficial del suelo. Esto hace que el horizonte de laboreo sea poco a poco una mezcla de los horizontes A y B o C, más pobres en materia orgánica.

3.3.5.2. Aportación de materiales

Dentro de esta denominación se engloban dos tipos de procesos que implican la adición de materiales al suelo: el aluvionamiento y el coluvionamiento.

El proceso de aluvionamiento ha dejado su huella en las áreas asociadas a los cauces actuales (llanuras aluviales y terrazas). Los perfiles estudiados, y en particular los desarrollados a partir de materiales finos, presentan carácter fluvéntico, evidenciando la distribución irregular de materia orgánica en profundidad. Los desarrollados a partir de materiales con gravas o materiales finos con gravas se encuentran en posiciones de terraza y presentan evidencias de calcificación o petrocalcificación (a partir de las terrazas del segundo nivel).

La dinámica actual de los cauces está fuertemente modificada por la actividad humana, habiéndose producido un aumento de la arroyada y formación de cárcavas como consecuencia de la extensión del cultivo (Gallart 1980). Esto repercute en la torrencialidad de los cauces y en el predominio de los fenómenos de transporte sobre los de sedimentación, consecuente con el aumento de la escorrentía directa.

El proceso de coluvionamiento se produce principalmente en las posiciones topográficas de fondo, en las partes inferiores de las vertientes cóncavas y en glacis de conexión con

niveles de terraza. Este proceso también suele conllevar perfiles con carácter fluvéntico (45% de 18 perfiles descritos en estas posiciones) y suelos muy profundos (67% de estos perfiles). No obstante, en estas posiciones se han descrito perfiles poco profundos (40-60 cm), que tienen como material subyacente calcilutitas o areniscas (p.e. perfil PM07 en el área modelo de Piera-Masquefa y perfil ML30 en el área modelo de Monistrol d’Anoia). Estos perfiles suelen encontrarse en fondos cercanos a la incisión de cárcavas o en partes inferiores de vertientes con pendiente moderada, donde predominan los procesos de erosión sobre los de sedimentación.

No se han encontrado diferencias significativas en los niveles de materia orgánica en los horizontes superficiales de estos perfiles (1.06%, n = 13) y los descritos en el resto del área de estudio (0.98%, n= 36), lo cual puede evidenciar la dinámica actual erosiva de las superficies topográficas originadas por procesos de coluvionamiento.

3.3.5.3. Meteorización

Los suelos del Alt Penedès-Anoia se han formado, principalmente, a partir de procesos de meteorización que han transformado los materiales incoherentes (calcilutitas y areniscas) que rellenan la depresión terciaria.

La disolución del carbonato cálcico de los elementos gruesos de caliza y de los materiales finos por acción del agua con el dióxido de carbono es uno de los principales procesos de meteorización química que tienen lugar. También, su posterior precipitación en otras partes del perfil del suelo. Esto queda patente a lo largo del área de estudio por las evidencias de movimientos de carbonatos en el suelo: disolución de gravas, cemento geopetal, nódulos y rizoconcrecciones de carbonato cálcico y cementaciones. La disolución y lavado de carbonatos en ciertos suelos con bajo contenido inicial de estos y/o en posiciones muy estables, también ha permitido la dispersión de arcilla y su traslocación en el suelo (proceso de iluviación de arcilla).

Se han descrito morfologías derivadas de procesos de óxido-reducción, que han afectado al hierro y manganeso, en forma de manchas. Estos procesos denotan etapas de oxidación (buena aireación) y de reducción en el proceso de formación de estos suelos.

La mayoría de perfiles susceptibles de estar sometidos a mal drenaje (fondos de valle y partes inferiores de vertientes cóncavas con escasa pendiente), presentan estado de oxidación. En un caso (perfil ML31 en el área modelo de Monistrol d’Anoia) se presentan evidencias de haber sufrido condiciones de reducción, que han hecho posible la movilización del hierro, y posteriormente la precipitación, dando lugar a manchas de oxidación (color 10YR4/6). Mientras, en otros suelos como el caso del perfil PP53 en el área modelo del Pla del Penedès, las actuales condiciones de saturación confieren carácter acuico al suelo, que presenta frecuentes manchas de reducción (color 5Y6/2).

Otros suelos que han sufrido condiciones reductoras, aunque actualmente presentan manchas de colores pardo amarillentas y naranjas (10YR5/8 y 7.5YR6/8), son los desarrollados en antiguas llanuras aluviales.

En los horizontes argílicos (perfiles PM05 y PM08 en la zona de Piera – Masquefa, y perfiles TL54 y TL61 en la zona de Torrelavit - Riudevittles) se han descrito manchas frecuentes, muy pequeñas, de color gris muy oscuro (2.5Y3/2 y 2.5Y3/1), asociadas a poros, debidas a reducción del hierro y manganeso. La aparición de estas manchas parece ser típica de las condiciones de formación de los horizontes argílicos (Soriano 1989, Benayas *et al.* 1991). Así mismo, la presencia de este tipo de manchas en algunos horizontes en los que actualmente no se observan revestimientos de arcilla, podría ser signo de su existencia pasada (p.e. perfil ML26 en el área modelo de Monistrol d’Anoia). De forma generalizada, se han encontrado manchas de óxido-reducción en calcilitas, que evidencian condiciones de hidromorfismo en el momento de su deposición.

3.3.5.4. Desarrollo de estructura

En la Tabla 3.13 se resumen los tipos y grados de desarrollo de la estructura, según tipos de horizontes, descritos en los perfiles tipo estudiados en el Alt Penedès – Anoia.

Tabla 3.13. Estructura de los horizontes de los perfiles tipo descritos en campo en el Alt Penedès – Anoia. (Frecuencia de horizontes).

| Estructura primaria | Estructura secundaria | Epipedión óchrico | | | Endopedión argílico | | Endopedión cálcico | | Endopedión cámbico y otros horizontes |
|--|--|-------------------|-----|-----|---------------------|----|--------------------|------|---------------------------------------|
| | | Ap | Ap1 | Ap2 | Bt | Ct | Bwkn | Crkn | Bw |
| Sin estructura por abundancia de elementos gruesos, granular simple o maciza | Inexistente | 1 | 1 | 2 | - | 2 | 4 | 20 | - |
| En bloques subangulares (Débil o Muy Débil) | Inexistente | 5 | 25 | 31 | - | - | 20 | - | 12 |
| | Granular compuesta (Débil) | 1 | 4 | 1 | - | - | - | - | - |
| | Granular compuesta (Moderada o Fuerte) | 2 | 7 | 2 | - | - | - | - | - |
| En bloques subangulares (Moderada o Fuerte) | Inexistente | 10 | 12 | 22 | - | - | 32 | - | 10 |
| | Granular compuesta (Débil) | 1 | 2 | - | - | - | 2 | - | 1 |
| | Granular compuesta (Moderada a Muy Fuerte) | 3 | 6 | 4 | 1 | - | 6 | - | 2 |
| | En formas debidas a la actividad de la fauna (Débil o Moderada) | - | - | - | - | - | 4 | - | - |
| Granular compuesta (Moderada o Fuerte) | Inexistente | 1 | 5 | - | - | - | - | - | - |
| Prismática (Moderada o Fuerte) | Inexistente | - | - | - | 4 | - | 2 | - | - |
| | En formas debidas a la actividad de la fauna (Moderada o Fuerte) | - | - | - | - | - | 1 | - | 1 |
| Total horizontes | | 24 | 62 | 62 | 5 | 2 | 71 | 20 | 26 |

Por tipos de horizontes, los superficiales muestran una tendencia a un grado de desarrollo débil o muy débil (52% de todos los horizontes Ap), con estructura en bloques

subangulares; sin existir diferencias significativas en el grado de desarrollo entre horizontes Ap1 y Ap2 (Tabla 3.14). No obstante, se aprecia una cierta tendencia al desarrollo de una estructura secundaria, de tipo granular compuesta, en horizontes Ap1, que puede explicarse por el mayor desarrollo de raíces finas, contenido de materia orgánica y actividad biológica en los primeros centímetros del suelo.

Los horizontes subsuperficiales, a excepción de algunos de suelos que han sufrido aportes recientes de materiales (llanuras de inundación y suelos con aportes coluviales) y otros desarrollados como consecuencia de la edafización de las calcilitas, presentan grados de desarrollo de estructura que, en la mayoría de los casos, difieren significativamente de los horizontes superficiales.

Los horizontes argílicos Bt y Btkn tienen una estructura prismática moderada o fuerte, típica de los horizontes ricos en arcilla. En los horizontes superficiales de estos suelos, que suelen ser parte de los argílicos puestos en superficie por la erosión y/o el laboreo, se observa un estado degradado de la estructura, generalmente débil en bloques subangulares.

Los horizontes cálcicos Bwkn han desarrollado una estructura en bloques subangulares, con grado moderado o fuerte, que difiere significativamente del desarrollo débil o muy débil que presentan los horizontes superficiales (Tabla 3.14). También es característico de estos horizontes el que puedan presentar, como estructura secundaria, el desarrollo de formas debidas a la actividad de la fauna.

Respecto a otros horizontes subsuperficiales caracterizados por el desarrollo de estructura, Bw, presentan tipos y grados de desarrollo que no difieren de los encontrados en horizontes superficiales, en suelos poco evolucionados (principalmente fondos de valle y llanuras aluviales). No se han descrito formas específicas de estructura debidas a la actividad de la fauna.

Tabla 3.14. Resultados de los tests de prueba de independencia entre frecuencias observadas y esperadas para la comparación del grado de desarrollo de estructura entre horizontes (Chi cuadrado).

| Estructura secundaria | Comparación entre horizontes Ap1 y Ap2 | | | |
|--|--|------------|-----------|-----------|
| | Ap1 | Ap2 | Ap1 | Ap2 |
| | Observadas | Observadas | Esperadas | Esperadas |
| Bloques subangulares (Débil o muy débil) | 36 | 34 | 35 | 35 |
| Bloques subangulares (Moderada o fuerte) | 20 | 26 | 23 | 23 |
| Otros | 6 | 2 | 4 | 4 |

Valor $X^2 = 4.18$; Valor $X^2 (P=0.05) = 7.81$; Valor $X^2 (P=0.01) = 11.34$. No existen diferencias significativas.

| Estructura secundaria | Comparación entre horizontes Ap1 y Ap2 (perfiles con horizontes cálcicos) | | | |
|--|---|------------|-----------|-----------|
| | Ap | Bwkn | Ap | Bwkn |
| | Observadas | Observadas | Esperadas | Esperadas |
| Bloques subangulares (Débil o muy débil) | 31 | 44 | 37.8 | 37.2 |
| Bloques subangulares (Moderada o fuerte) | 4 | 7 | 5.5 | 5.5 |
| Otros | 6 | 2 | 4 | 4 |

Valor $X^2 = 8.11$; Valor $X^2 (P=0.05) = 5.99$; Valor $X^2 (P=0.01) = 9.21$. Diferencias significativas $P < 0.05$.

| Estructura secundaria | Comparación entre horizontes Ap y Bw | | | |
|--|--------------------------------------|------------|-----------|-----------|
| | Ap | Bw | Ap | Bw |
| | Observadas | Observadas | Esperadas | Esperadas |
| Bloques subangulares (Débil o muy débil) | 16 | 13 | 17.4 | 11.6 |
| Bloques subangulares (Moderada o fuerte) | 2 | 1 | 1.8 | 1.2 |
| Otros | 6 | 2 | 4 | 4 |

Valor $X^2 = 0.51$; Valor $X^2 (P=0.05) = 5.99$; Valor $X^2 (P=0.01) = 9.21$. No existen diferencias significativas.

Los horizontes superficiales presentan estructuras degradadas, debido a la acción del laboreo intensivo y al paso de la maquinaria. El hecho de que, aproximadamente, el 50% de los suelos estudiados muestren evidencias de mezcla de materiales de horizontes superficiales y subsuperficiales, independientemente de lo que suponga respecto a la pérdida de suelo, indica una degradación de la estructura de los suelos, tal y como demuestran las diferencias entre tipos y grados de desarrollo entre horizontes. Esta degradación representa una influencia negativa en las condiciones de aireación, movimiento del agua, formación de costra superficial y erosionabilidad del suelo.

3.3.5.5. Iluviación de arcilla

El Alt Penedès-Anoia es un área rica en suelos resultado de sucesivos procesos de argiluvación que han tenido lugar en el pasado (Gallart 1981).

Actualmente, gran parte de los suelos donde ha habido argiluvación están enterrados por aportes más recientes (Figura 3.18). Otros suelos descritos con horizontes argílicos no enterrados por aportes más recientes están sometidos a procesos de recarbonatación y erosión hídrica.



Figura 3.18. Suelo con horizonte argílico enterrado por aportes aluviales recientes en una terraza del río Anoia.

Los suelos descritos en el área de estudio con signos de argiluviación ocupan las posiciones más antiguas. Presentan evidencias de truncamiento por acción de la erosión, con el endopediún argílico en superficie, que es el que actualmente se cultiva. Estas observaciones coinciden con las realizadas por Boixadera (1983) en una cuenca de Piera-Masquefa, donde describe la existencia de relictos de argílicos en posiciones antiguas alejadas de grandes barrancos. En otras ocasiones han sido incorporados por completo a horizontes Ap por laboreo.

3.3.5.6. Acumulación de carbonatos (calcificación)

Según los resultados analíticos, que se resumen en la Tabla 3.15, los materiales originarios con menor contenido de carbonato cálcico se localizan en la zona de Piera, y proceden del área fuente donde afloran esquistos y cuarcitas. Estos materiales presentan contenidos muy bajos de carbonato cálcico (0.2-5% de CO_3Ca).

Tabla 3.15. Contenido de carbonato cálcico equivalente de los horizontes de los perfiles tipo analizados (frecuencia de horizontes).

| Clase de contenido de CO_3Ca equivalente (% en peso) | Ap | Bt, Ct, Btkn | Bwkn | Bw | Bk | Crkn | C |
|--|----|--------------|------|----|----|------|----|
| Nulo (<0.2%) | - | - | - | - | - | - | - |
| Muy bajo (0.2-5%) | 2 | 2 | - | 2 | - | - | 5 |
| Bajo (5-10%) | - | 3 | 1 | - | - | - | - |
| Medio (10-20%) | 8 | - | 2 | - | 2 | 1 | 4 |
| Moderadamente alto (20-30%) | 8 | 1 | 7 | 6 | 1 | - | 3 |
| Alto (30-40%) | 28 | 1 | 20 | 5 | 2 | 1 | 7 |
| Muy alto (>40%) | 16 | - | 18 | 1 | 1 | 2 | 9 |
| Total | 62 | 7 | 48 | 14 | 6 | 4 | 28 |

La mayoría de los materiales originarios analizados (67.8 % de los horizontes C), presentan un contenido de carbonato cálcico de moderadamente alto a muy alto (>20% CO_3Ca), dándose los máximos (>50% CO_3Ca) en calcilutitas de la zona de Masquefa. Esto indica que, en general, los suelos se han desarrollado en materiales ricos en carbonatos y

que, dado el régimen de humedad del suelo no percolante, el carbonato cálcico se trasloque en el perfil y de lugar a acumulaciones secundarias.

Por horizontes, los mayores contenidos de carbonato cálcico se dan en horizontes Ap, Bwkn y Crkn. Más del 75% de estos horizontes presentan contenidos altos o muy altos (normalmente >30% CO₃Ca). Perfiles tipo con estas características son PM13 (en el área modelo de Piera – Masquefa), TL58 y TL59 (en el área modelo de Torrelavit – Riudeviltles). El enriquecimiento en carbonato cálcico de los horizontes Ap está provocado por la mezcla por laboreo con horizontes Bwkn, Crkn o Bkm subyacentes, ya sea por labores muy profundas, o porque la erosión ha reducido el espesor de los horizontes superficiales, o por un efecto de ambos, que en la mayoría de los casos es difícil de distinguir.

Esto concuerda con las observaciones realizadas en campo, de que 66 de los 88 perfiles de suelos descritos presentan, en el horizonte de laboreo y en superficie, evidencias de mezcla, como la presencia de rizoconcrecciones de caliza (23% de los casos), nódulos de calcio (25% de los casos) o fragmentos de horizontes petrocálcicos (10% de los casos).

Es de destacar el alto contenido en carbonato calcio de algunos horizontes argílicos recalcificados (perfil TL54), traducido en la presencia de acumulaciones muy abundantes en forma de nódulos y rizoconcrecciones. Esto indica la existencia de un proceso de recarbonatación sobre antiguos horizontes argílicos. En otros casos (perfiles PM08 y TL61) este proceso es más incipiente. Los contenidos de carbonato cálcico son bajos o muy bajos, pero se presentan formas de acumulación como pseudomicelios o pequeñas rizoconcrecciones. Actualmente, los horizontes superficiales de estos perfiles tienen contenidos de carbonato cálcico 15.3 y 29.2% respectivamente, respecto a 6.4 y 6.9% de los argílicos recalcificados. Esto puede producir la recarbonatación de estos horizontes.

Respecto a la cantidad de acumulaciones de carbonato cálcico, un 82.7% de los horizontes subsuperficiales presenta algún tipo de acumulación secundaria (Tabla 3.16).

Tabla 3.16. Acumulaciones secundarias de carbonatos descritas en horizontes de los perfiles tipo.

| Cantidad (% en volumen) | Endopedión Cálcico | | | Endopedión Argílico | | Otros horizontes |
|----------------------------|--------------------|------|------|---------------------|-----|---------------------|
| | Bk | Bwkn | Crkn | Btkn | Ctk | |
| Pocas (<2%) | 1 | 7 | 1 | - | - | 15 |
| Frecuentes (2-20%) | 6 | 41 | 6 | 1 | 1 | - |
| Abundantes (20-40%) | 1 | 12 | 7 | - | - | - |
| Muy abundantes (>40%) | 1 | 11 | 6 | 2 | - | - |
| Generalizadas | - | 1 | - | - | - | - |
| Total | 9 | 72 | 20 | 3 | 1 | 15 |

Las formas más frecuentes son las rizoconcrecciones de caliza en horizontes Bwkn, Btkn y Crkn; los nódulos de carbonato cálcico en horizontes Bwkn y Crkn; los pseudomicelios en horizontes Bwk y Ctk y el cemento geopetal y revestimiento de elementos gruesos en horizontes Bk.

3.3.5.7. Formación de horizontes petrocálcicos (petrocalcificación)

Las sucesivas redisoluciones y reprecipitaciones de la caliza han dado lugar, en las posiciones más estables (divisorias tabulares o plataformas, terrazas fluviales y glacis) a la formación de horizontes cementados (petrocálcicos).

Actualmente, estos horizontes pertenecen a suelos localizados en formas del relieve residuales, que han resistido a la erosión por haberse desarrollado en depósitos de gravas. Los horizontes petrocálcicos suelen haberse formado bajo un horizonte argílico, en una secuencia Ap-Bt-Bwkn-Bkm (perfil PM05); bajo un horizonte cámbico, en una secuencia Ap-Bw-Bkm (perfil ML27); o directamente bajo un horizonte A, dando lugar a suelos superficiales (perfil TL59).

3.3.5.8. Mezcla de horizontes por laboreo y erosión

La erosión lleva a la progresiva desaparición de los horizontes superiores, más fértiles, y a la determinación de nuevas condiciones en el suelo resultante. Generalmente, los efectos de la erosión no suelen ser evidentes en terrenos de cultivo hasta transcurridos varios años, ya que mediante las operaciones de laboreo se enmascara el proceso. Estos materiales son incorporados de los horizontes subsuperficiales, que pueden llegar a tener características muy diferentes de los horizontes A originales: materia orgánica, contenido de carbonato cálcico, estructura, textura, cantidad de elementos gruesos, etc. Con el progreso de la erosión, los horizontes A iniciales pueden llegar a ser sustituidos totalmente por materiales de horizontes subyacentes o llegar a aflorar el material originario o roca madre en superficie.

La evaluación de la condición erosionada de los suelos suele hacerse en base a evidencias de la erosión ya sucedida, como la presencia de arroyaderos y cárcavas en las inmediaciones del perfil, lavado de elementos gruesos en superficie y pedestales, la disminución del espesor de los horizontes A (comparada con el espesor de horizontes de suelos similares no afectados) y las evidencias de mezcla de horizontes (SCS 1981).

En el Alt Penedès-Anoia, al tratarse de una zona con gran expansión del cultivo de la viña en los últimos siglos, es difícil encontrar terrenos vírgenes no marginales que se puedan tomar como referencia para poder comparar el espesor de horizontes superficiales y determinar el grado en el que el horizonte A se ha perdido por erosión.

Por otra parte, evaluar la condición erosionada por las evidencias de erosión laminar, por arroyaderos y cárcavas en las inmediaciones del perfil puede llevar a error, ya que el continuo laboreo al que están sometidos los suelos elimina las evidencias de erosión laminar o por arroyaderos. La existencia de cárcavas en una parcela no siempre implica que los suelos en las proximidades sufran una alta erosión laminar o por arroyaderos, causantes de la pérdida de componentes del suelo que se pretende evaluar.

Así, las evidencias más significativas para determinar la condición erosionada de los suelos son las de mezcla de horizontes. Ahora bien, operaciones de laboreo muy profundas pueden producir evidencias similares a las de erosión en los horizontes superficiales por el efecto de mezcla con materiales de horizontes subsuperficiales. Este hecho ocurre de manera frecuente en el área de estudio, donde se realizan operaciones de laboreo, con

volteo del suelo, previas a la plantación de la viña, de hasta 60-75 cm (Figura 3.19). Estas operaciones tienen el fin de crear una capa más aireada para estimular el desarrollo radicular y el establecimiento de la viña.



Figura 3.19. Operación de volteo de la parte superior del suelo previa a la plantación de viñas en una parcela.

En 66 de los 89 perfiles tipo estudiados se han encontrado evidencias de mezcla de horizontes en el horizonte de laboreo, ya sea por un efecto de la erosión, del laboreo o por un efecto conjunto de ambos (Tabla 3.17).

Tabla 3.17. Evidencias de mezcla de materiales en horizontes superficiales por el efecto de la erosión y/o el laboreo profundo.

| Tipo de evidencia | Número de perfiles descritos |
|---|------------------------------|
| Fragmentos de calcilitas o areniscas | 15 |
| Fragmentos de horizonte petrocálcico | 5 |
| Abundancia de elementos gruesos | 4 |
| Nódulos de CO ₃ Ca o pisolitos | 17 |
| Rizoconcrecciones | 15 |
| Fragmentos de horizontes Bw o C | 3 |
| Fragmentos de horizontes Bt | 1 |
| Nivelaciones | 6 |
| Total perfiles con evidencias de mezcla | 66 |

Mayoritariamente, las evidencias de mezcla descritas son elementos característicos de horizontes cálcicos o petrocálcicos (56% de los perfiles con evidencias), seguido por suelos poco profundos con calcilitas o areniscas como material subyacente (22.7% de los

casos). En otros casos (9.1%) la mezcla se debe a movimientos de tierra producidos por nivelaciones. Estos últimos perfiles se han excluido de posteriores análisis relativos a la erosión.

Respecto a la profundidad de laboreo como causa de existencia de evidencias de mezcla en los horizontes superficiales, no se puede concluir que esta sea el único determinante, aunque hay una clara tendencia a encontrar evidencias de mezcla en suelos sometidos a labores de más de 50 cm de profundidad (Tabla 3.18).

Tabla 3.18. Resultados de los tests de prueba de independencia entre frecuencias observadas y esperadas para la comparación de la presencia de evidencias de mezcla en horizontes superficiales en función de la profundidad máxima de laboreo.

| Profundidad máxima de laboreo | Perfiles con evidencias de mezcla | | Perfiles sin evidencias de mezcla | |
|-------------------------------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|
| | Observadas | Esperadas | Observadas | Esperadas |
| ≤ 30 cm | 14 | 17 | 9 | 5.9 |
| 30 - 50 cm | 27 | 28.2 | 11 | 9.8 |
| > 50 cm | 25 | 20.8 | 3 | 7.2 |

Valor $X^2 = 5.65$; Valor $X^2 (P=0.05) = 5.99$; Valor $X^2 (P=0.01) = 9.21$.

No existen diferencias significativas.

El efecto conjunto de mezcla de materiales de horizontes superficiales y subsuperficiales por erosión y/o laboreo profundo tiene consecuencias en algunas propiedades de los suelos.

Además de haberse encontrado niveles de materia orgánica bajos o muy bajos en los suelos descritos, también se han encontrado contenidos significativamente menores en perfiles que muestran evidencias de mezcla de horizontes (Tabla 3.19). Dentro de estos perfiles, los contenidos de materia orgánica son menores en los que presentan una profundidad máxima de laboreo de 30 cm. En estos suelos es más probable que la aparición en el horizonte de laboreo de materiales de horizontes subsuperficiales se deba únicamente al efecto de la erosión y no a la excesiva profundidad de laboreo.

Tabla 3.19. Prueba t-Student de separación de medias entre los contenidos de materia orgánica en los horizontes superficiales de suelos con evidencias de mezcla de materiales y de perfiles sin evidencias de mezcla.

| Todos los suelos estudiados | | |
|--|--|--|
| | Materia orgánica (%) en horizontes superficiales sin evidencias de mezcla | Materia orgánica (%) en horizontes superficiales con evidencias de mezcla |
| Media | 1.17 | 0.91 |
| Varianza | 0.33 | 0.21 |
| Observaciones | 17 | 31 |
| Grados de libertad | 46 | |
| Estadístico t(*) | 1.69 | Diferencias significativas con P<0.05 |
| P(T<=t) una cola | 0.048 | |
| Valor crítico de t (una cola) | 1.67 | |
| (*) Prueba t suponiendo varianzas iguales | | |
| Suelos con profundidad máxima de laboreo de 30 cm | | |
| | Materia orgánica (%) en horizontes superficiales sin evidencias de mezcla | Materia orgánica (%) en horizontes superficiales con evidencias de mezcla |
| Media | 1.17 | 0.78 |
| Varianza | 0.33 | 0.05 |
| Observaciones | 11 | 12 |
| Grados de libertad | 13 | |
| Estadístico t(*) | 2.07 | Diferencias significativas con P<0.05 |
| P(T<=t) una cola | 0.029 | |
| Valor crítico de t (una cola) | 1.77 | |
| (*) Prueba t suponiendo varianzas desiguales | | |

Respecto al contenido de carbonato cálcico en los horizontes superficiales, se puede deducir que hay un aumento en los horizontes con evidencias de mezcla respecto a los que no presentan mezcla, aunque no se pueden establecer diferencias significativas (Tabla 3.20). Estas diferencias se incrementan en el caso de considerar por separado los perfiles con una profundidad máxima de laboreo de 30 cm, lo que parece indicar una mayor incidencia de la erosión respecto al laboreo profundo en el aumento del contenido de carbonato cálcico en los horizontes superficiales.

Tabla 3.20. Prueba t-Student de separación de medias de contenido de carbonato cálcico en perfiles con evidencias de mezcla en los horizontes superficiales de suelos con evidencias de mezcla de materiales y de perfiles sin evidencias de mezcla.

| Todos los suelos estudiados | | |
|--|---|---|
| | Carbonato cálcico (%) en horizontes superficiales sin evidencias de mezcla | Carbonato cálcico (%) en horizontes superficiales con evidencias de mezcla |
| Media | 30.8 | 34.0 |
| Varianza | 67.69 | 165.02 |
| Observaciones | 14 | 33 |
| Grados de libertad | 38 | |
| Estadístico t(*) | 1.01 | No existen diferencias significativas |
| P(T<=t) una cola | 1.158 | |
| Valor crítico de t (una cola) | 1.67 | |
| (*) Prueba t suponiendo varianzas desiguales | | |
| Suelos con profundidad máxima de laboreo de 30 cm | | |
| | Carbonato cálcico (%) en horizontes superficiales sin evidencias de mezcla | Carbonato cálcico (%) en horizontes superficiales con evidencias de mezcla |
| Media | 30.8 | 36.7 |
| Varianza | 67.68 | 88.67 |
| Observaciones | 14 | 12 |
| Grados de libertad | 24 | |
| Estadístico t(*) | 1.70 | No existen diferencias significativas |
| P(T<=t) una cola | 0.051 | |
| Valor crítico de t (una cola) | 1.71 | |
| (*) Prueba t suponiendo varianzas iguales | | |

Otra propiedad importante de los horizontes superficiales es la estructura. Según el análisis realizado entre la estructura de los horizontes con evidencias de mezcla de materiales de horizontes subsuperficiales y sin evidencias de mezcla observadas, se puede concluir que no existen diferencias significativas ni en el tipo de estructura y grado de desarrollo, ni en el tamaño de los agregados ni en la existencia de estructura secundaria (Tabla 3.21). Esto puede explicarse por la influencia del laboreo intensivo, extendido a todo el área de estudio, que se aplica al cultivo de la viña, con continuas labores superficiales de eliminación de malas hierbas, incorporación de fertilizantes, etc., que han destruido la estructura original de los horizontes, supuestamente con mayor frecuencia de tipo granular compuesta.

Esto no quiere decir que no pueda haber diferencias en la estabilidad estructural de los agregados de diferentes tipos de suelos, tal como ha mostrado Ramos (1997), en suelos tipo de esta área de estudio.

Tabla 3.21. Resultados de los tests de prueba de independencia entre frecuencias observadas y esperadas para la comparación de la estructura en los horizontes superficiales de suelos con evidencias de mezcla de materiales de horizontes subsuperficiales y de suelos sin evidencias de mezcla.

| Tipo de estructura | Perfiles con evidencias de mezcla | | Perfiles sin evidencias de mezcla | |
|--|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|
| | Observadas | Esperadas | Observadas | Esperadas |
| Bloques subangulares (débil o muy débil) | 30 | 29 | 10 | 11 |
| Bloques subangulares (moderada o fuerte) | 24 | 24.6 | 10 | 9.3 |
| Granular compuesta | 4 | 2.9 | 2 | 1.7 |

Valor $X^2 = 0.28$; Valor $X^2 (P=0.05) = 5.99$; Valor $X^2 (P=0.01) = 9.21$. No existen diferencias significativas.

| Tamaño de los agregados | Perfiles con evidencias de mezcla | | Perfiles sin evidencias de mezcla | |
|-------------------------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|
| | Observadas | Esperadas | Observadas | Esperadas |
| Fino | 6 | 5.8 | 2 | 2.2 |
| Mediano | 26 | 25.4 | 9 | 9.6 |
| Grueso | 26 | 26.8 | 11 | 10.2 |

Valor $X^2 = 0.16$; Valor $X^2 (P=0.05) = 5.99$; Valor $X^2 (P=0.01) = 9.21$. No existen diferencias significativas.

| Estructura secundaria | Perfiles con evidencias de mezcla | | Perfiles sin evidencias de mezcla | |
|---------------------------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|
| | Observadas | Esperadas | Observadas | Esperadas |
| Sin estructura secundaria | 38 | 39.9 | 17 | 15.1 |
| Con estructura secundaria | 20 | 18.1 | 5 | 6.9 |

Valor $X^2 = 1.05$; Valor $X^2 (P=0.05) = 3.84$; Valor $X^2 (P=0.01) = 6.63$. No existen diferencias significativas.

La profundidad efectiva del suelo sí ha mostrado diferencias muy significativas en los perfiles con evidencias de mezcla (Tabla 3.22). Los suelos con evidencias de mezcla presentan una profundidad media de 83 cm, respecto a los suelos sin evidencias que se pueden clasificar como muy profundos (128 cm). Esto indica una progresiva reducción de la profundidad efectiva de los suelos del área de estudio, causada por la pérdida de suelo que supone la erosión.

Tabla 3.22. Prueba t-Student de separación de medias de la profundidad efectiva del suelo en perfiles con evidencias de mezcla en horizontes superficiales y sin evidencias de mezcla.

| Todos los suelos estudiados | | |
|---|---|---|
| | <i>Profundidad efectiva (cm), Perfiles sin evidencias de mezcla</i> | <i>Profundidad efectiva (cm), Perfiles con evidencias de mezcla</i> |
| Media | 128.9 | 83.2 |
| Varianza | 2597.64 | 2227.31 |
| Observaciones | 24 | 59 |
| Grados de libertad | 81 | |
| Estadístico t (*) | 3.91 | Diferencias significativas con P<0.01 |
| P(T<=t) una cola | 0.00009 | |
| Valor crítico de t (una cola) | 1.66 | |
| (*) Prueba t suponiendo varianzas iguales | | |

3.4. Conclusiones

A) Sobre el sistema de información de suelos (SIS):

- El SIS desarrollado ha permitido analizar, de una forma global, la información de suelos relativa al área de estudio. Este análisis confirma que los suelos del Alt Penedès – Anoia sufren procesos intensos de erosión y/o de transformación antrópica. Estos procesos están llevando a la pérdida progresiva, no renovable a corto o medio plazo, del recurso suelo, con la puesta en superficie de materiales de horizontes subyacentes ricos en carbonato cálcico o de materiales originarios como calcilitas o areniscas, desfavorables para el sustento de los usos agrícolas actuales.
- El modelo conceptual propuesto de estructura de datos del SIS refleja las relaciones suelo-paisaje subyacentes en la información de suelos adquirida. La entidad principal de este SIS es la unidad cartográfica, que contiene información sobre los componentes de suelos, de paisaje, y además tiene representación espacial a través de las delineaciones del mapa.
- El SIS, que recoge información sobre el patrón de distribución espacial de los suelos a escala semidetallada, constituye la base sobre la cual se pueden llevar a cabo cartografías a nivel más detallado, de gran interés en las áreas o parcelas a transformar.
- El hecho de adoptar la familia de suelos como base de las unidades taxonómicas presentó problemas a la hora de la elección de un perfil tipo que representase a la unidad taxonómica. Dentro de una familia se distinguieron distinguir varios perfiles tipo con características diferenciales que corresponderían a distintas series. Esta variabilidad ha quedado reflejada gracias a considerar diferentes perfiles modales dentro de cada familia de suelos, que ponen de manifiesto diferencias respecto a propiedades limitantes diferenciales como la profundidad de los suelos.

B) Sobre las características de los suelos y el modelo de suelo-paisaje del Alt Penedès – Anoia:

- El modelo de suelo-paisaje muestra que la complejidad del patrón de distribución de los suelos es función de la complejidad de las geformas, la cual está relacionada con la intensa dinámica denudacional del paisaje.
- Esta intensa dinámica denudacional del paisaje se pone de manifiesto en la distribución espacial y en las características actuales de los suelos:
 - Suelos más evolucionados, como los Palexeralfs petrocálcicos y Haploxeralfs cálcicos, que se han desarrollado en posiciones estables, presentan en la actualidad evidencias de truncamiento de los horizontes A originales. La incipiente incisión de cárcavas y barrancos en las geformas donde se han desarrollado (glacis de pie de monte) está produciendo una inversión del patrón de distribución de los suelos, con suelos menos profundos en las partes inferiores de las vertientes y más profundos en las partes intermedias y altas.

- Los suelos de las vertientes complejas del área de vertientes y barrancos suelen presentar evidencias del truncamiento de los horizontes superficiales originales y de puesta en superficie de materiales de horizontes subsuperficiales. En esta unidad es donde el patrón de distribución de los suelos es más complejo.
- La mayoría de los niveles residuales resistentes del área de vertientes y barrancos y del área de relieve suavemente ondulado han desaparecido. Actualmente, o bien se encuentran Xerochrepts calcixeróllicos o Xerorthents típicos desarrollados en las calcilitas subyacentes o bien Xerochrepts calcixeróllicos desarrollados en areniscas incoherentes o conglomerados sin cementar.
- Los suelos más abundantes del Alt Penedès – Anoia son primero los Xerochrepts calcixeróllicos y después los Xerorthents típicos. También son frecuentes los Xerochrepts fluvénticos, con un endopedión cálcico, y los Xerochrepts petrocálcicos. La abundancia de suelos con evidencias de acumulación secundaria de carbonato cálcico en alguno de sus horizontes es reflejo de: a) la riqueza de los materiales originarios de los suelos en carbonato cálcico (principalmente calcilitas con 30-50% de CO_3Ca y gravas calizas), y b) del régimen de humedad no percolante de los suelos (xérico), que permite la traslocación en el perfil del carbonato cálcico aunque no su lavado total. La intensidad de los procesos de calcificación se pone de manifiesto en la elevada frecuencia de suelos con mineralogía carbonática.

3.5. Referencias bibliográficas

Agbu, P.A., Ojanuga, A.G. y Olson, K.R.,1989, Soil – landscape relationships in the Sokoto – Rima basin, Nigeria. *Soil Science*, 148: 132-139.

Aguilar, J., 1989, Cartografía y evaluación de suelos. *Ponencias y Comunicaciones de la XVI Reunión de la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo*. DMCS-UPC&SECS. Lleida, pp 13-37.

Benayas, J., Alcalá, L., Monturiol, F. y Guerra, A.,1991, Paleoprocesos edáficos en superficies pliocuaternarias del centro de España. *Suelo y Planta*, 1: 287-301.

Boixadera, J., 1983, *Proyecto de un área modelo de conservación de suelos en Piera-Masquefa*. PFC, ETSEA, UPC, Lleida.

Boixadera, J., Danés, R. y Porta, J., 1989a, CatSIS: Sistema de información de suelos de Cataluña. *Ponencias y Comunicaciones de la XVI Reunión de la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo*. DMCS-UPC&SECS. Lleida, pp. 74.

Boixadera J., Herrero, C., Danés, R. y Roca, J., 1989b, Cartografía de suelos semiáridos de regadío: Área regable por los canales de Urgell (Lérida). *Ponencias y Comunicaciones de la XVI Reunión de la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo*. DMCS-UPC&SECS. Lleida.

Boixadera, J., Porta, J. y Antúnez, M.,1990, Degradació de sòls per erosió hídrica en àrees de conreu de vinya de la D.O. Penedès. *Actas II Congrés de l'ICEA*, pp. 251-259.

Boixadera, J. y Porta, J., 1991, *Información de suelos y evaluación catastral. Método del valor índice*. Centro de Gestión Catastral y Cooperación Tributaria, Ministerio de Economía y Hacienda, Madrid.

Boixadera, J. y Porta, J., 1995, Informació de sòls i sostenibilitat de la vinya al Penedès: Plans de conservació de sòls i aigües. En: *Jornades de Transferència de Tecnologia sobre Conservació de Sòls i Aigües en Vinyes*, J.A. Martínez-Casasnovas (editor), DMACS-UdL i INCAVI-DARP, Vilafranca del Penedès-Lleida, pp. 70-79

Boixadera, J. e Ibañez, J.J., 1996, Spain, soil survey and soil databases. En: *Soil databases to support sustainable development*, C. Le Bas y M. Jamagne (editores), JRC European Commission-INRA, Orleans, pp. 99-105

Boulaine, J, 1980, *Pedologie appliquée*. Ed. Mason. París.

Brooks, N.K, Ffolloptt, P.F., Gregersen, H.M. y Thomas J.L., 1991, *Hydrology and the management of watersheds*. Iowa State University Press, Iowa.

Burrough, P.A., 1991, Soil information systems. In: *Geographical Information Systems, Volume 2: Application*, D.J. Maguire, M.F. Goodchild y D.W. Rhind (editores). Longman Scientific & Technical, New York, reprint 1994, chapter 44, pp. 153-169.

Burrough, P.A., 1993, The technology paradox in soil survey: nes methods and techniques of data capture and handling. *ITC Journal* 1993-1: 15-22.

C.B.D.S.A., 1983, *SINEDARES, Manual para la descripción codificada de suelos en campo*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España, Madrid.

Cervera, J.M., 1994, *Avaluació del territori i sostenibilitat: Aplicació al cas del conreu de la vinya en un àrea model del l'Anoia-Penedès (Barcelona)*. PFC. ETSEA-UdL. Lleida.

Date, C.J., 1990, *An introduction to database systems, Volume I*. Addison-Wesley Publsh. Co., Reading, Massachusetts.

FAO, 1979, Soil survey investigation for irrigation. FAO Soils Bulletin 42, FAO, Roma.

FAO, 1990, *Mapa mundial de suelos. Leyenda revisada*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma.

Fernández, R.N. y Rusinkiewicz, M., 1993, A conceptual design of a soil database for a geographical information system. *International Journal of Geographic Information Science*, 7: 525-539.

Fernández, R.N., Rusinkiewicz, M., Morais, L. y Johannsen, J., 1993, Design and implementation of a soil geographic database for rural planning and management. *Journal of Soil and Water Conservation*, 48: 140-145.

Frigolé, I., 1997, *Una metodologia per a la generalització automatitzada de mapes detallats de sòls*. PFC, ETSEA-UdL, Lleida.

Gallart, F., 1980, *Estudi geomorfològic del Penedès, sector Anoia i Riedevitlles*. Tesis doctoral, Universidad de Barcelona.

Gallart, F., 1981, Neógeno superior y Cuaternario del Penedès (Catalunya, España). *Acta Geológica Hispánica*, 16: 151-157.

Herrero, C., Alcoverro, T., Boixadera, J., Danés, R., Porta, J., Rius, X. y Teixidó N., 1993, Denominació d'horitzons genètics (i capes). *Quaderns Agraris*, 16: 111-126.

Hewitt, A.E., 1994, Introduction to soil-landscape models. In: *Soil-landscape modelling in New Zealand*, T.H. Webb (editor), Landcare Research Science Series No. 5. Manaaki Whenua Press, Lincoln, pp. 6-11.

Kreznor, W.R., Olson, K.R., Banwart, W.L. y Johnson, D.L., 1989, Soil, landscape, and erosion relationships in a Northwest Illinois watershed. *Soil Science Society America Journal*, 53: 1763-1771.

López, C., 1994, *Establecimiento de un plan de conservación de suelos en un área modelo de 490 ha en el Alt Penedès*. PFC. ETSEA-UdL. Lleida.

M.A.P.A., 1986, *Métodos oficiales de análisis de suelos. Tomo 3*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España. Madrid.

Martínez-Casasnovas, J.A., 1992, Mapa detallado de suelos de "Les Baixes Garrigues". *III Curso de Clasificación, Cartografía y Evaluación de Suelos*. Documentación del curso (difusión restringida), DMCS, Lleida.

Molenaar, M., 1993, Object hierarchies and uncertainty in GIS or Why is standardisation so difficult. *Geo-Information-Systemes*, 4: 22-28.

Nieves, M., Forcada, R. y Gómez, V., 1985, Precisión, escala y densidad de observaciones en los estudios de suelos. *Boletín de la Estación Central de Ecología* núm. 27. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

Nizeyimana, E. y Bicki, T., 1992. Soil and soil – landscape relationships in the north central region of Rwanda, East-Central Africa. *Soil Science*, 153: 225-236.

Poch, R. y Porta, J., 1995, Estratègies per a la conservació de sòls i aigües en vinyes. Mesures de conservació. En: *Jornades de Transferència de Tecnologia sobre Conservació de Sòls i Aigües en Vinyes*, J.A. Martínez-Casasnovas (editor), DMACS-UdL i INCAVI-DARP, Vilafranca del Penedès-Lleida, pp. 56-62.

Poch, R.M., Martínez-Casasnovas, Usón, A. y Ramos, M.C., 1996, Conservació de sòls en vinyes de l'Anoia-Penedès: Un enfoc cap a la sostenibilitat. *Jornades Agràries de la Fira de Sant Josep*. Col. Ofic. Eng. Tèc. Agr. de Catalunya i Patronat Fires de Mollerusa. Mollerusa. 13 pp.

Porta, J., López-Acevedo, M. y Rodriguez, R., 1986, *Técnicas y experimentos en edafología*. Col.legi Oficial d'Enginyers Agrònoms de Catalunya. Barcelona.

Porta, J., Boixadera, J. y Antúnez, M., 1989, *Estudio de los procesos erosivos y diseño de medidas de conservación de suelos en Mas Bernich (Masquefa, Barcelona)*. Convenio CT-0927. UPC, Lleida.

Porta, J., López-Acevedo, M. y Roquero, C., 1994, *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Mundi Prensa, Madrid.

Roca, J., Boixadera, J. y Herrero, C., 1990, Relaciones geomorfología – suelos en el Pla d'Urgell. *I Reunión Nacional de Geomorfología*, pp 709-719.

Roquero, C. y Porta, J., 1986, *Agenda de campo para el estudio del suelo. 4ª Edición*. UPM - ETSIA. Madrid.

Stolt, M.H., Baker, J.C. y Simpson, T.W., 1993a, Soil – landscape relationships in Virginia: I. Soil variability and parent material uniformity. *Soil Science Society America Journal*, 57: 414-421.

Stolt, M.H., Baker, J.C. y Simpson, T.W., 1993b, Soil – landscape relationships in Virginia: II. Reconstruction analysis and soil genesis. *Soil Science Society America Journal*, 57: 422-428.

Soil Survey Staff, 1975, *Soil Taxonomy: a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. Agric. Handbook 436. Superint of Doc, US Govt Printing Office, Washington, D.C.

Soil Survey Staff, 1994, *Keys to Soil Taxonomy. 6th edition*. U.S. Department of Agriculture – Soil Conservation Service. Washington, D.C.

Soriano, M., 1989, Factores formadores y características generales de los Luvisoles desarrollados sobre materiales calizos y su distribución en la provincia de Valencia. *Anales de Edafología y Agrobiología*. XLVIII: 799-812.

Swanson, D.K., 1990, Soil landform units for soil survey. *Soil Survey Horizons*, 31: 17-21.

Valenzuela, C.R., 1988, Soils geography. *ITC Journal* 1988-1: 45-50.

Van Wambeke, A. van y Forbes, T. (editores), 1985, *Guidelines for using Soil Taxonomy in the names of Soil Map Units*. SMSS Tech Monograph num. 10.

Walker, P.H., 1989, Contributions to the understanding of soil and landscape relationships. *Australian Journal of Soil Research*, 27: 589-605.

Zinck, J.A., 1988, *Physiography and Soils. Soil Survey Courses*. Subject matter K6. ITC Lecture Notes SOL-41.

Zinck, J.A. y Valenzuela, C.R., 1990, Soil geographic database: structure and application examples. *ITC Journal* 1190-3: 270-294.

4. Gully erosion in the Alt Penedès-Anoia region (NE Spain): A remote sensing and GIS perspective for mapping and modelling.

4.1. Introduction

4.1.1. Gully erosion mapping and modelling strategies

The causes, processes, prediction and control of gully erosion have aroused the interest of many researchers (Ireland *et al.* 1939, Thompson 1964, SCS 1966, Seginer 1966, Heede 1976, Stocking 1980, Imeson and Kwaad 1980, Donker and Damen 1984, Moore *et al.* 1988, Crouch and Blong 1989, Bocco 1990, Brooks *et al.* 1991, Vazquez and Zinck 1994, Palacio and López 1994, Zinck 1997, Meyer and Martínez-Casasnovas 1998).

Several strategies have been used to map the effects of gully erosion processes and to predict the risk of gully erosion and its environmental, social and economical implications. The mapping and modelling strategies are summarised in Figure 4.1. Most of the works have been addressed either to map the extension of existing gully erosion or to model gully erosion by means of statistically related terrain factors.

Three mapping approaches are distinguished to map existing gully erosion: a) maps showing existing gullies and present erosional activity, b) maps showing the degree of gully erosion on the basis of indices, and c) methods to compute the retreat of gullies and gully erosion rates. Most of the research works that have been carried out in the context of any of those mapping approaches are based on the use of remote sensing techniques (aerial photography and satellite images), that are considered the most valuable tools in gully erosion mapping (Bergsma 1982, Bergsma 1987) and ISSS (1996).

In the field of mapping and characterisation of gullies, Ireland *et al.* (1939) deserve the credit for being ones of the first researchers drawing attention to differences on gully morphologies. They pointed out that differences on gully forms are produced by physical and land use factors influencing drainage. These authors also recognised four distinct stages of gully growth, that up-to-date are used for description of gully forms. In the same line, Imeson and Kwaad (1980) described different gully types and discussed the degree to which predictions of future gully growth can be made on the basis of field phenomena. The understanding of gully morphology was also shown by Heede (1970) and Crouch and Blong (1989) as a first step to evaluate gully processes and as a link between past, present and future gully erosion.

Other studies that pay attention to the location of erosion features and their degree of activity are the works of Shouten (1976, quoted by Bergsma 1982), Williams and Morgan (1976), van Zuidam (1985) and Crouch and Blong (1989). Satellite images offer interesting possibilities to investigate gully erosion (Solé *et al.* 1986), provided that gullies affect areas wide enough to be covered by the resolution of the images (Giordano and Marchisio 1991). Multi-spectral remote sensing techniques, and videography (Palacio and López 1994), have been applied to map the extension of gully erosion phenomena (Solé *et al.* 1986, Martínez-Casasnovas *et al.* 1997, Serrat and Martínez-Casasnovas 1998), and to map the present erosional activity of gully walls from the mapping of vegetation cover (Martínez-Casasnovas and Cervera 1996).

A step forward in the characterisation of gully erosion are the so referred to as (in the present research) the quantitative-ordinal methods. These try to assess the degree of

affection of an area by means of an ordinal number, usually on the basis of a gradation of gully density values, gully frequency or gully length x number of gullies (Bucko and Mazurova 1958 quoted by Richter 1980, Morgan 1973, Williams and Morgan 1976, Zachar 1982 quoted by Stroosnijder and Eppink 1993, Garg and Harrison 1992). The quantitative-ordinal methods are always dependent on expert knowledge. These methods are quite useful to distinguish significant observable differences on the gradation of gully erosion severity. They have been used as gully erosion risk models (Williams and Morgan 1976), although they mainly indicate the degree of landscape dissection.

The third approach for characterisation of existing gully erosion is addressed to map the rate of gully retreat and the rate of gully erosion (loss of soils and geologic materials). Traditionally stakes have been used for these purposes (Zinck 1997). Most recently, large and medium scale multi-temporal aerial photographs and videographic techniques have been used to monitor gully growth and to compute gully retreat rates (Strömquist *et al.* 1985 quoted by Brooks *et al.* 1991, Palacio and López 1994). Other authors have also investigated the application of photogrammetric techniques, using multi-temporal aerial photographs, to map the volumetric changes occurred in gullies, and then to calculate the amount of eroded materials and the rate of gully erosion (Thomas *et al.* 1986, Dyamon and Hicks 1986). The possible benefits of using multi-temporal digital elevation models to compute gully erosion rates were pointed out by Thomas *et al.* (1986).

In the modelling field, gully erosion has not been studied as much as sheet erosion. A reason may be the physical processes related to the formation and the development of gullies are less understood (Heede 1976, Imeson and Kwaad 1980, Thomas *et al.* 1986, Zinck 1997). Only a reference to the deterministic growth model for gullies of Foulkner has been found (Heede 1976). The constraints of this model are quite important in view of the uniformity of the terrain conditions where it was developed and the variability of environments supporting gully systems. The framework of a deterministic approach to model mass movements processes has been recently proposed by Zinck (1997). Mass movements and gully erosion are closely related: the former are one of the main causes of gully retreat, and the instability of slopes generated by gully incision causes mass movements.

Gully Erosion Mapping and Modelling Strategies

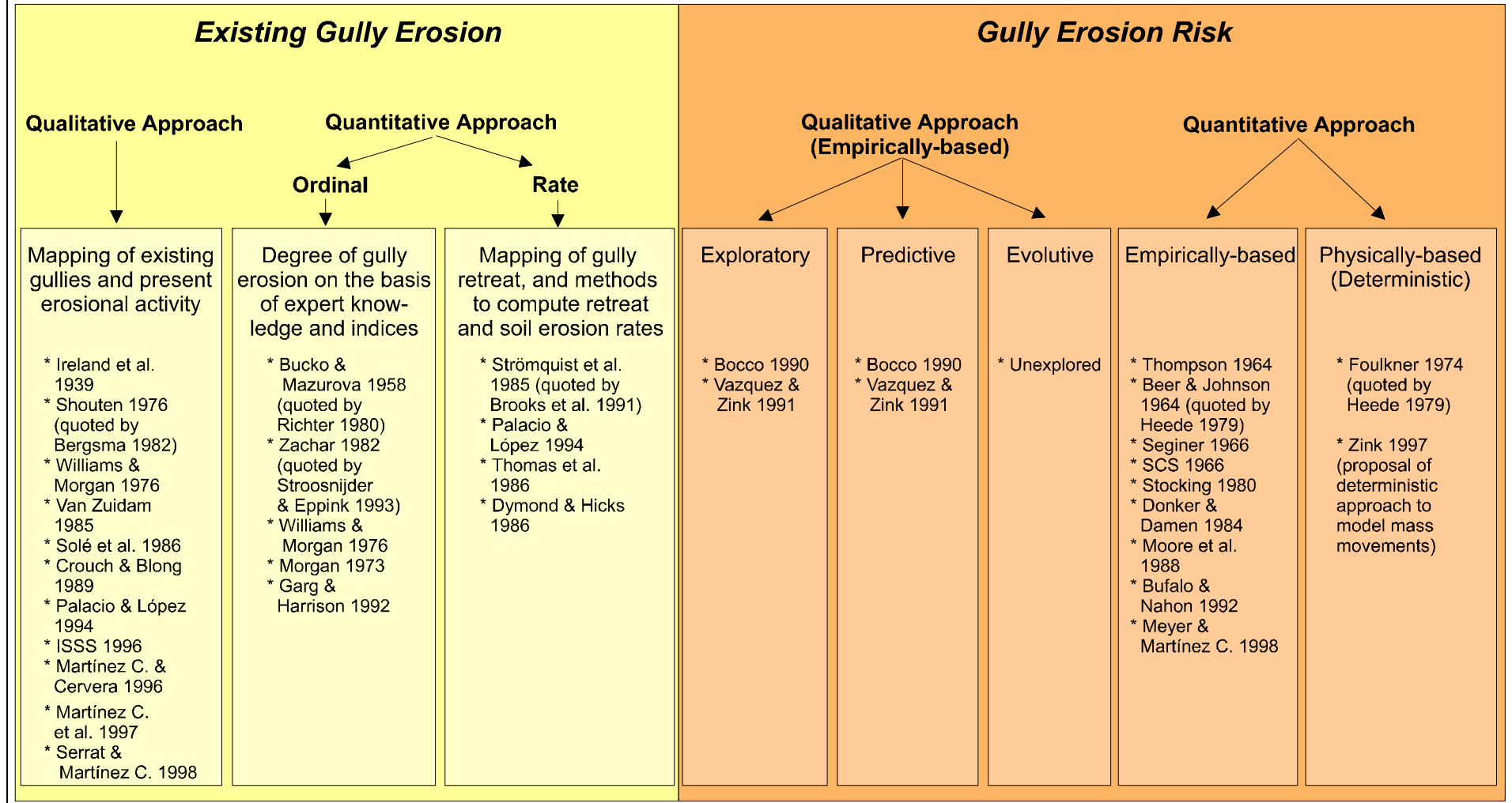


Figure 4.1. Gully erosion mapping and modelling strategies.

The lack of knowledge on the physics of gully erosion processes has encouraged the development of empirically-based models. Most of them are addressed to predict future gully erosion from terrain related factors, on the basis of significant statistical relationships. Three types of models are distinguished within this group: a) models that predict the development of existing gullies on the basis of rainfall conditions and catchment characteristics (Thompson 1964, SCS 1966, Seginer 1966; Beer and Johnson 1964 quoted by Heede 1976); b) models that predict the locations where development of new gullies is expected under given terrain/land use conditions (Stocking 1980, Donker and Damen 1984, Moore *et al.* 1988, Meyer and Martínez-Casasnovas 1998); and c) models that predict the amount of eroded materials on gully walls (Bufalo and Nahon 1972). All those models are study area dependent, and the correlation between existing gully erosion and terrain related factors should be tested before those models are applied to other study areas.

Other type of risk gully erosion models have a more qualitative basis. According to Zinck (1997) these can be classified in exploratory, predictive and evolutive. The exploratory models try to identify non-explicit cause-effect relationships between gully erosion and existing terrain conditions. Good examples of this modelling approach are the works of Bocco (1990) and Vazquez and Zinck (1994). These authors used remote sensing and GIS cartographic modelling to identify the terrain factors related to the existence of gully erosion. The empirical relationships are translated into logical rules, and then they are used as predictive models. The predictive models so formulated are usually implemented in GIS platforms.

Finally, the evolutive modelling approach tries to predict the future gully erosion on the basis of the past or recent past dynamics. Some works have been carried out in this field by using remote sensing techniques (Strömquist *et al.* 1985 quoted by Brooks *et al.* 1991, Palacio and López 1994, Martínez-Casasnovas *et al.* 1997). They are oriented to map the gully affected areas and to compute erosion rates. The analysis of the gully erosion pattern and the projection of this pattern to predict locations of future gully erosion, which should be the essence of the evolutive modelling approach, remain still unexplored. It is an interesting field for research, that today is nearer to more investigators and planners thanks to the extension of remote sensing and GIS technologies, which are the basis for data acquisition and analysis.

4.1.2. The gully erosion problem in the study area

The Mediterranean basin is not an exception to the problem of gully erosion (Giordano and Marchisio 1991, Bufalo and Nahon 1992, Solé-Benét *et al.* 1997). Intense precipitation events during autumn and spring (Ramos and Porta 1993, Ramos and Porta 1994), unconsolidated parent materials (calclutites, limestones or sandstones), rainfed crops that only cover partially the soil (vineyards, almond and olive tree plantations, etc.) and numerous abandoned agricultural fields in high slope degree terrain (Cerdeira 1994, Chisci 1994) constitute favourable conditions for gully erosion.

The interest for the soil erosion problem in the Mediterranean basin is reflected in the work of Giordano and Marchisio (1991). These authors analysed and correlated existing soil erosion maps and methods in this region. Most of the works map the risk of erosion on the

basis of land unit characteristics, or they are based on the USLE (Wischmeier and Smith 1978) or some of its factors.

The Alt Penedès – Anoia region, located in the Mediterranean basin, suffers serious gulling problems (see chapter 1). Table 4.1 summarises the main geomorphologic and lithologic characteristics of the area, whose main landscape units are represented in Figure 4.2.

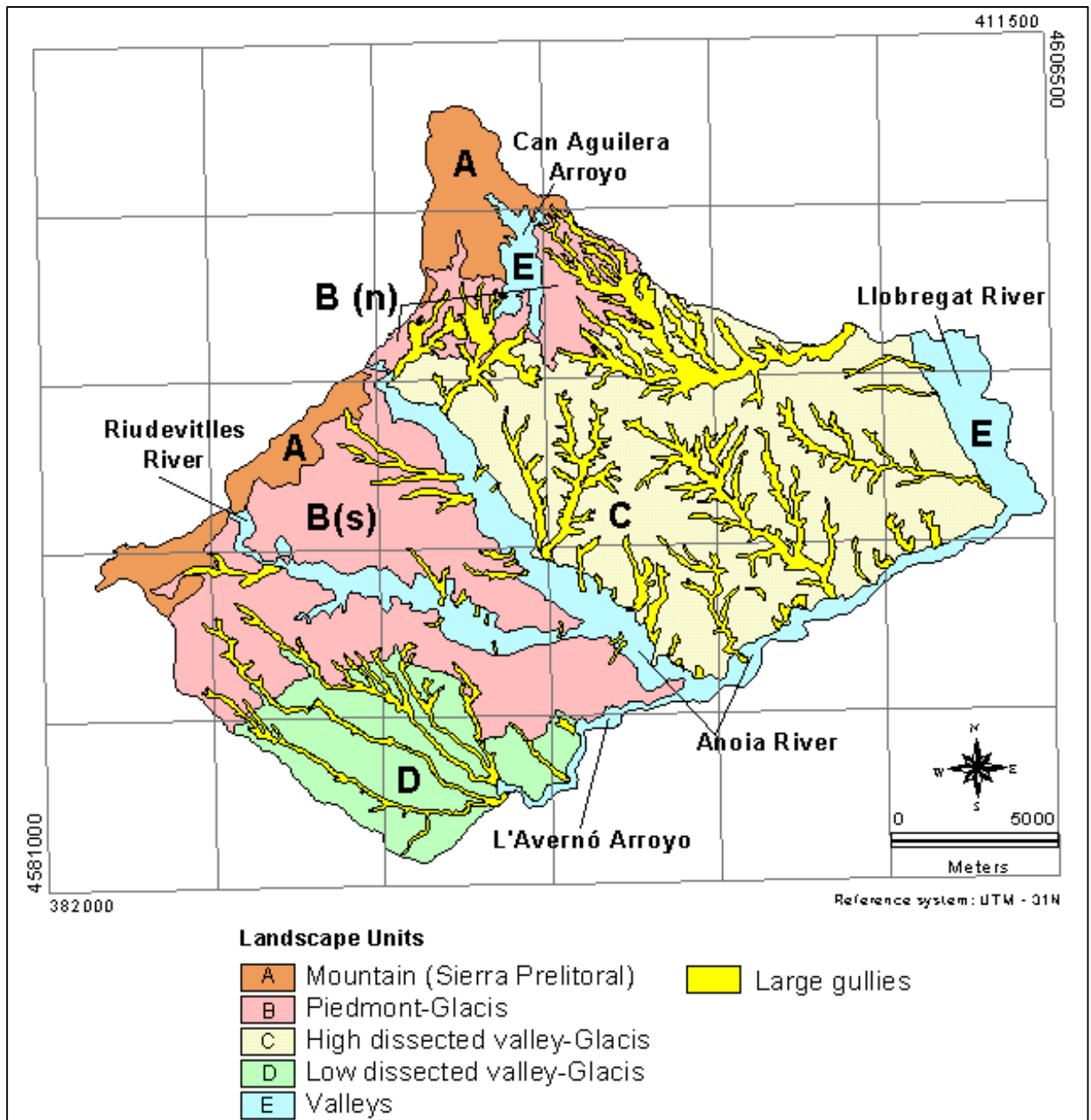


Figure 4.2. Main landscape units in the Alt Penedès – Anoia region and gully eroded areas.

Table 4.1. Main landscape units in the Alt Penedès-Anoia region.

| Landscape Unit | Main geomorphologic and lithologic characteristics |
|--|--|
| A. Mountain (Sierra Prelitoral) | <p>Relief: Typically steep or very steep terrain (>25% slope degree). Dominance of convex forms. Mean relieve amplitude 41 m. Drainage density 3.4 km km⁻².</p> <p>Main relief/landform units: Steep and very steep slopes (>20% slope degree).</p> <p>Lithology: Calcareous rocks (southern part of the area) and Schists (northern part).</p> |
| B. Piedmont – Glacis | <p>Relief: Typically elevated (residual) plane surfaces. The incision of the drainage network has originated linear and concave slopes (5-15% s. degree) or plane surfaces are abruptly incided by gullies (northern part of the unit). Relief amplitude: between 7 m (low dissected surfaces) and 25 m (high dissected surfaces). Drainage density 3.1 km km⁻².</p> <p>Main relief/landform units: Residual plane surfaces, glacis and gentle slopes (1-5% s. degree), sloping slopes (5-10% s. degree), gentle and sloping complex slopes (5-15% s. degree), steep and very steep slopes (20-30% s. degree) and infilled valley bottoms.</p> <p>Lithology: Quaternary cemented deposits over Tertiary conglomerates (plane surfaces southern area), red clays and metamorphic gravels (plane surfaces northern area), and Tertiary calcilutites and sandy calcilutites (slopes).</p> |
| C. High dissected valley – Glacis | <p>Relief: Typically complex slopes, rolling to hilly terrain (5-20% slope degree). Slopes are abruptly incided by deep gullies. Mean relieve amplitude 13-20 m (out of gullies). Drainage density 3.4 km km⁻².</p> <p>Main relief/landform units: Rounded crests, gentle complex slopes (5-10% s. degree), sloping complex slopes (10-15% s. degree), moderate steep slopes (15-25% s. degree).</p> <p>Lithology: Tertiary calcilutites, sandy calcilutites and conglomerates (unconsolidated).</p> |
| D. Low dissected valley – Glacis | <p>Relief: Typically simple linear or concave slopes, gentle or moderate slope degree (1-10%). Relieve amplitude: between 6 m in rounded crests and 19 m in moderate degree slopes. Drainage density 3.2 km km⁻².</p> <p>Main relief/landform units: Rounded crests and sloping concave slopes (5-10% s. degree), glacis and gentle slopes (1-5% s. degree), moderate sloping to steep slopes (5-20% s. degree), steep and steep slopes (20-45% s. degree), infilled valley bottoms.</p> <p>Lithology: Tertiary calcilutites and sandy calcilutites (unconsolidated).</p> |
| E. Valleys | <p>Relief: Typically composed of terraces and flood plains. Terraces are dissected by gullies. The representative terrace level are at a relative altitude of 30-50 m from the river bed. Drainage density 1.5 km km⁻².</p> <p>Main relief/landform units: Terraces, flood plains.</p> <p>Lithology: Recent alluvial deposits, cemented by calcium carbonate in the higher level terraces.</p> |

One of the main characteristics of the area is the dissection of the landscape by a dense and deep network of gullies. Inter-gully areas are usually undulating to rolling, with complex slopes (see chapter 2). The development of the gully system has been favoured by the cropping of vineyards, that strongly generates overland flow during high intensity precipitation events. Surplus runoff is usually concentrated in hillside ditches (called “rases”), that flow either into main drainage channels or directly into gullies. This favours the formation of gullies at ditches or drainage outlet points and in this manner the gully network enlarges linearly. Then gullies grow by deepening in the unconsolidated Tertiary deposits. Mass movements on sidewalls produce parallel widening of gullies.

In view of the necessity of the establishment of control measures in the study area, there is a lack and the need of studies related to the mapping of gully eroded areas, the present erosional activity of the gully walls, the estimation of gully erosion rates, the identification of the most active areas and the risk of development of new gullies as well as the development of existing gullies.

In this respect, the objectives of the present research are:

- a) The characterisation of gully erosion in the Alt Penedès – Anòia at regional scale,
- b) The estimation of gully erosion rates and the mapping of the gully growth pattern,
- c) The mapping of the potential for gully erosion: probability of the existence of gully erosion at parcel level and development of existing gullies.

4.2. Methodology

The methodological approach that is proposed is based on the study of the gully erosion phenomena at different scale levels, from the analysis at regional scale to the probability of existence of gullies at parcel level (see Figure 4.3). This methodological approach is carried out in the context of remote sensing and GIS techniques for data acquisition as well as for data analysis, in addition to field observations.

4.2.1. Mapping of gully erosion at regional scale

Two main aspects were analysed: a) the drainage network system (pattern, density, gully's size, gully-eroded area and volume) and b) the present erosional activity of gully walls and its relation to the active erosion process. The detailed methodological process is presented in Figure 4.4.

The drainage network system was mapped by means of aerial photo-interpretation, using 1:30.000 scale photographs acquired in 1984 and 1986 and field observations. A maximum network mapping approach, as proposed by Gregory and Gardiner (1975), was considered. Several types of elements were distinguished: river beds, large gullies (>10 m depth and >50 m width, representable as area features at 1:50.000 scale), medium-size gullies (2-10 m depth and <50 m width, not representable as area features at 1:50.000 scale), incipient gullies (<2 m depth and <2-3 m width), infilled valleys, V-shaped valleys and canalised gullies. All those elements were represented as line features to compute drainage density and to determine the drainage pattern. The resulting drainage network was drawn on a 1:50.000 orthophoto and digitised as a line ArcInfoTM coverage.

To have a complete drainage network at the working scale, avoiding the lack of elements due to visual errors, an automatically-derived drainage network was overlaid to the photo-interpreted results. This drainage network was obtained from a digital elevation model (DEM) 25 m resolution (produced by the Servicio Geográfico del Ejército), following the experimental approach of the threshold area value giving the best fit drainage network, as proposed by Martínez-Casasnovas and Stuiver (1998). In this respect, the capabilities of ArcInfo-GridTM were used, applying a threshold area value of 38 cells to derive the drainage network of the area to the north of the Anòia river and 63 for the area to the south (with different relief types).

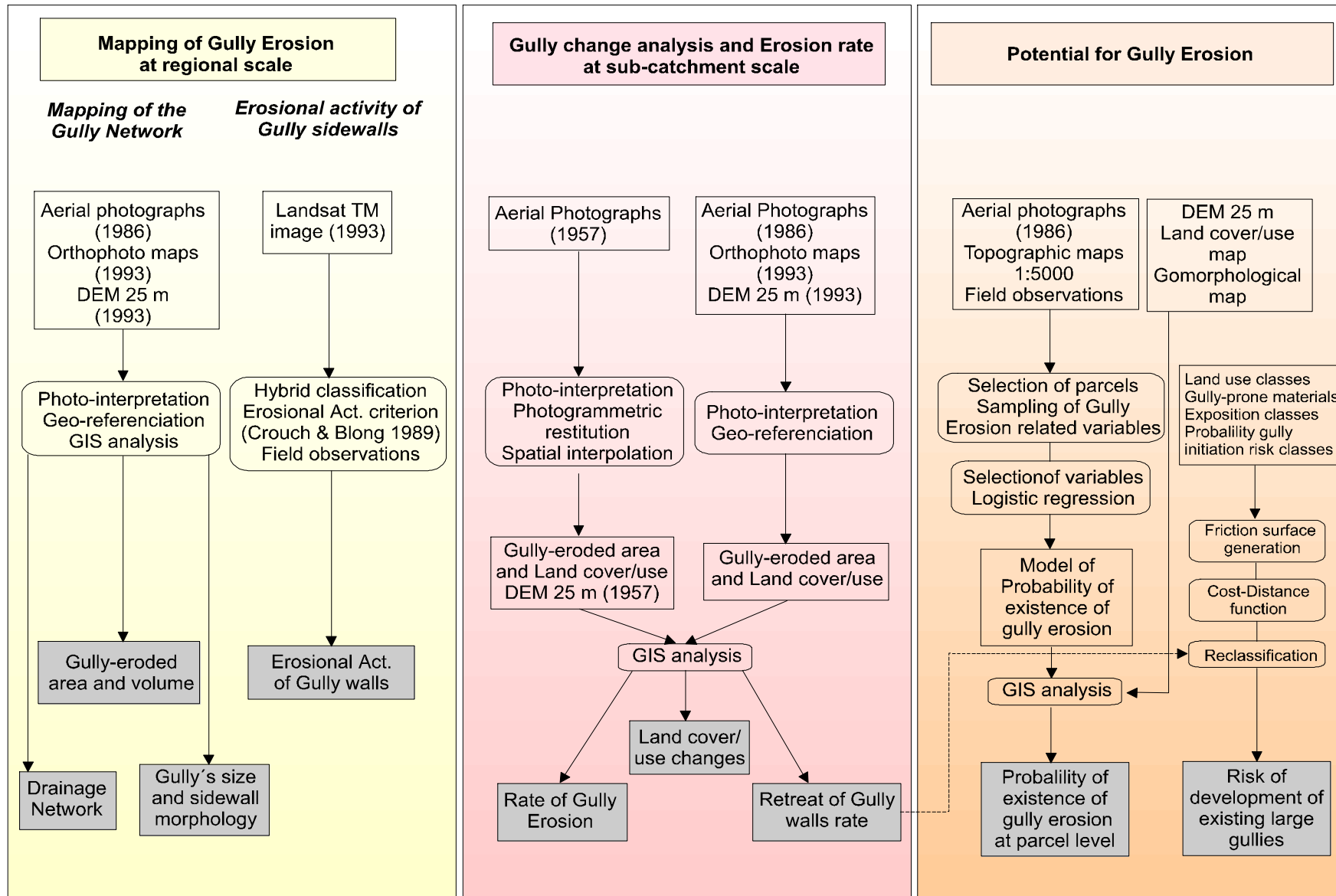


Figure 4.3. Research plan for gully erosion mapping and modelling in the Alt Penedès - Anoia region.

The extension of the area eroded by large gullies was mapped by means of aerial photo-interpretation. The boundary of the eroded area was drawn along convex slope break lines that mark the incision of gullies in the unconsolidated Tertiary deposits. The result was drawn on a 1:50.000 scale orthophoto and digitised as a polygon ArcInfo™ coverage. Some of the boundary lines were corrected using a slope raster map, produced from the DEM 25 m resolution, as background image.

The volume of the materials eroded by large gullies was computed from the DEM. A theoretical cover surface of present gullies was generated by means of the interpolation between height values of the DEM cells forming the perimeter of the gullies. This surface was smoothed by a 3x3 average moving-window. The so derived DEM of the gully-cover surface was overlaid to the DEM representing the actual topography. A subtraction was performed to obtain the gully depth and the eroded volume.

Twenty-three cross-sections were made in different parts of large gullies to provide us with information on shape, depth, slope and other characteristics related to forces resisting erosion and the nature of processes on the sidewalls, that mark the lateral development of gullies. The cross-sections of height and slope were produced by profiling the 25 m resolution DEM and the derived slope raster, obtained by means of the “curvature” function of ArcInfo-Grid™. The gullies were compared with the stages of evolution identified by Ireland *et al.* (1939) and the types of gullies distinguished by Imeson and Kwaad (1980).

The methodology to map the present erosional activity of large gullies was based on the method of Crouch and Blong (1989), which involves the mapping of the vegetation cover on gully walls. These authors identified 20% vegetation cover as the critical minimum below which erosion rates on gully walls are very high, and erosional activity is considered as active. Above 70% vegetation cover, gully walls are considered as stable. Active processes in the different situations were recognised by means of field observations and they were related to gully sidewall morphology and vegetation cover. The detailed methodological process is presented in Figure 4.5.

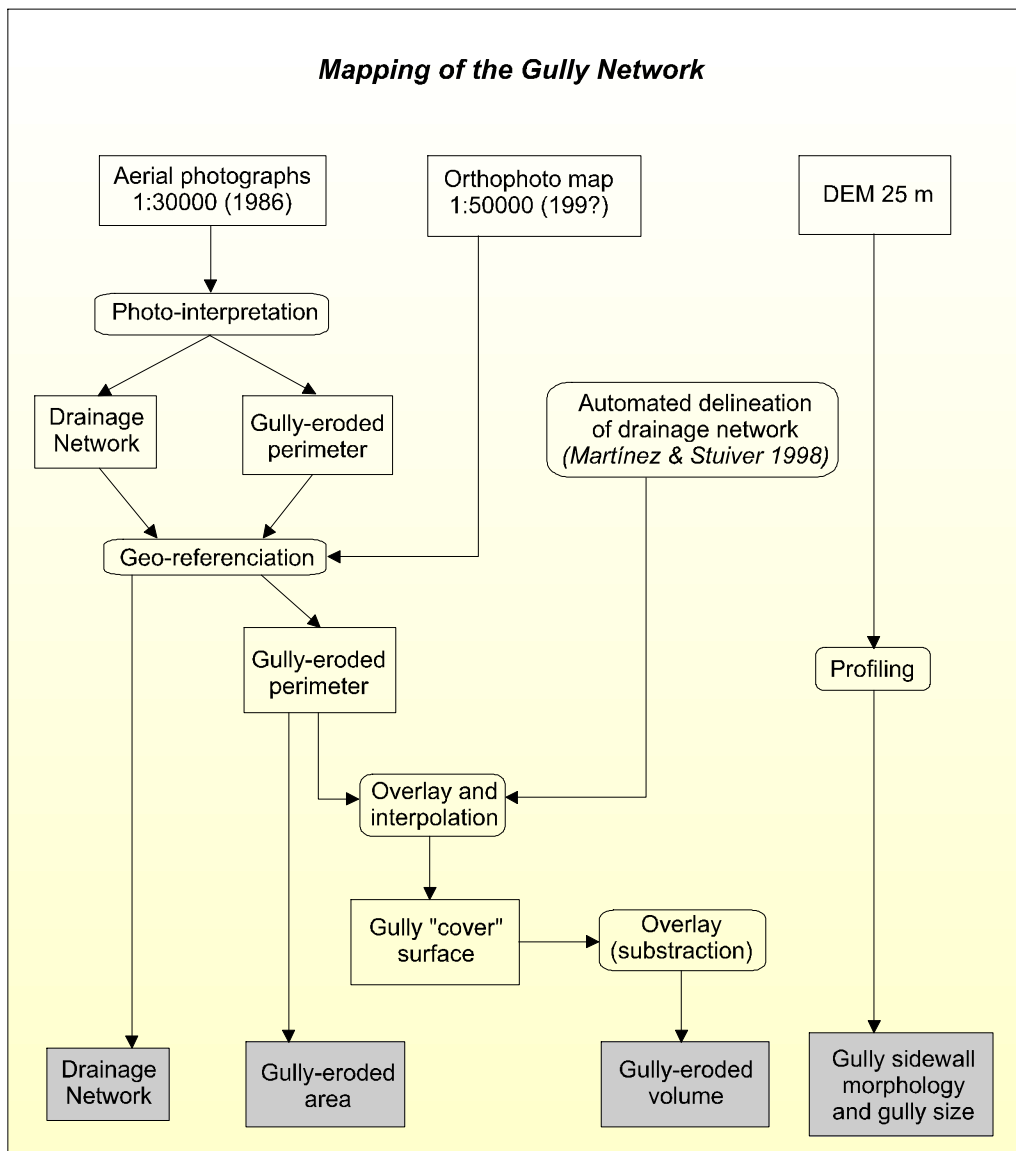


Figure 4.4. Methodological process applied to the characterisation of gully erosion at regional scale: drainage network, gully-eroded area and volume and sidewall morphology.

Provided the big size of large gullies (between 75-375 m width and up to 60 m depth), a Landsat TM subscene (March 1993) was used to map the vegetation cover on gully sidewalls. The pixel was slightly decreased from 30 m resolution up to 25 m, in order to match the resolution of the DEM. The classification of the image was made by means of a hybrid unsupervised-supervised process, using bands 4, 5, 7, NDVI and principal component analysis bands 1, 2 and 3 as a colour composition, following the approach of land cover/use mapping unit definition and generalisation from remotely sensed data proposed by Martínez-Casasnovas (see section 5.2). Approximately 1% of the study area was sampled to assess the accuracy of the classification, that yielded an overall accuracy of 80.6%. The main informational classes for the classification of the image are summarised in Table 4.2.

Table 4.2. Main informational classes for land cover/use mapping in the Alt Penedès – Anoia

| Land cover/use class | Description |
|--|---|
| Bare gully sidewalls and badlands | Gully sidewalls and badlands without vegetation cover |
| Semivegetated gully sidewalls and badlands | Gully sidewalls and badlands, less than 30% vegetation cover (shrubland): <i>Brachipodium ramosum</i> , <i>Ulex parviflorus</i> , <i>Genista sp.</i> , <i>Juniperus oxicedrus</i> , <i>Rosmarinus officinalis</i> , <i>Thymus vulgaris</i> , <i>Quercus coccifera</i> , <i>Pinus halepensis</i> |
| Grassland & shrubland | Grassland & shrubland, 30-60% vegetation cover, typically southern oriented areas: <i>Brachypodium ramosum</i> , <i>Ulex parviflorus</i> , <i>Genista sp.</i> , <i>Rosmarinus officinalis</i> , <i>Thymus vulgaris</i> , <i>Spartium junceum</i> , <i>Lepidium graminifolium</i> , <i>Quercus coccifera</i> |
| Shrubland | Shrubland, 50-75% vegetation cover, typically north and eastern oriented areas: <i>Brachipodium phoenicoides</i> , <i>Vicia sp.</i> , <i>Spartium junceum</i> , <i>Diplotaxis eruroides</i> , <i>Shorgum halepense</i> , <i>Genista sp.</i> , <i>Rosmarinus officinalis</i> , <i>Quercus coccifera</i> , <i>Quercus ilex</i> |
| Forested shrubland | Forested shrubland, 65-80% vegetation cover, typically north and northwestern oriented areas: <i>Brachipodium phoenicoides</i> , <i>Coriaria myrthifolia</i> , <i>Vicia sp.</i> , <i>Spartium junceum</i> , <i>Genista sp.</i> , <i>Pistacia lentiscus</i> , <i>Rosmarinus officinalis</i> , <i>Quercus ilex</i> , <i>Pinus halepensis</i> , <i>Pinus pinea</i> |
| Forested areas | Forested areas, 65-80% vegetation cover, typically northern oriented areas: <i>Pinus halepensis</i> , <i>Pinus pinea</i> , <i>Quercus ilex</i> , <i>Quercus coccifera</i> |
| Vineyards | Old traditional or modern vineyard plantations, without vegetation cover at the date of the image |
| Winter cereals | Well-developed winter cereals: wheat or barley |
| Bare soil parcels | Bare soil parcels and recent level parcels |
| Residential or industrial built-up areas | Residential (urban and recreational) or industrial built-up areas |

The initial erosional activity classes, as proposed by Crouch and Blong (1989), were adapted to the results of the land cover mapping method. The following classes were finally considered: Active – Semi-active (<40% vegetation cover), Semi-active (40-60% vegetation cover) and Semi-active – Stable (>60% vegetation cover).

The landscape unit map at 1:50.000 scale (Figure 4.2), was used to relate gully erosion and geomorphologic and lithologic terrain characteristics. Five main landscape units were identified (see chapter 2). The principal geomorphologic and lithologic characteristics are summarised in Table 4.1.

4.2.2. Gully change analysis and estimation of erosion rates at sub-catchment scale

A study based on a multi-temporal analysis of remotely sensed data (aerial photographs from 1957 and 1986 at 1:30.000 scale and orthophotos from 1993 at 1:25.000 scale) and digital elevation models was applied to:

- a) map and to analyse the changes on small and medium-size gullies within the considered period,
- b) map an to analyse the changes on the vegetation cover on the walls of large gullies,
- c) map the retreat of the walls of large gullies an to compute the retreat rate,
- d) compute the rate of material losses by gully erosion in the considered period.

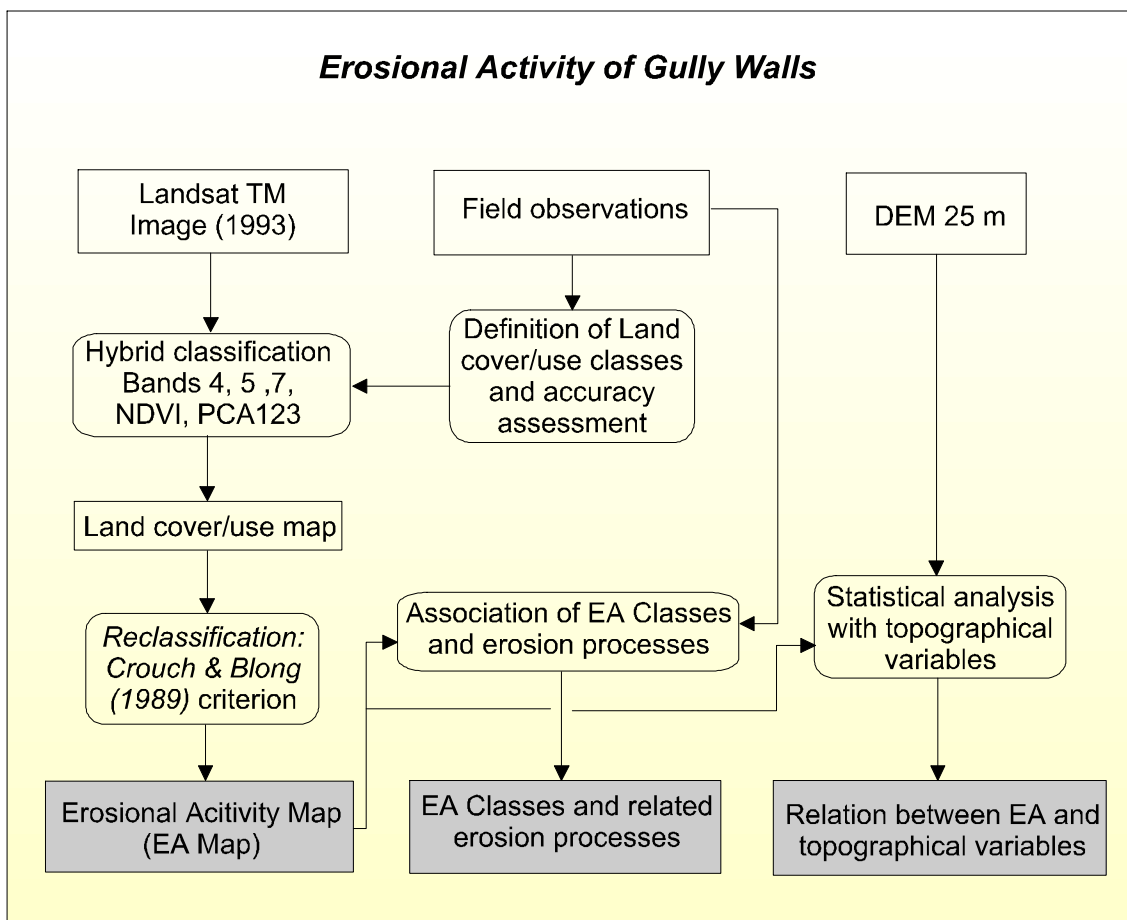


Figure 4.5. Methodological process for mapping the present erosional activity of walls of large gullies.

The materials that are referred in the last paragraph, that are affected by gulling, are compound by soils and, in a large extent, by Tertiary deposits of calcilutites. An average value of 1735 kg m^{-3} , computed from measures made for the present research and by Usón (1998), was considered as bulk density value of the calcilutites, in order to estimate the weight of the eroded materials.

The methodological process is presented in Figure 4.6. According to the mapping scale (1:25.000) gullies 2-10 m depth and <25 m width were considered medium-size gullies, and gullies <2 m depth and 2-3 m width as small or incipient gullies. The volume of the eroded materials during this period was estimated by subtraction elevation data from 1957 and 1993. The DEM of 1957 situation was generated by spatial interpolation using 20 m spaced contour lines. The contours were drawn by means of photogrammetric restitution of the 1957 aerial photographs. The resolution given to the DEM was 25 m, the same as the 1993 DEM produced by the Servicio Geográfico del Ejército. The computation of the average rate of gully erosion and the study of changes was only applied to the Rierusa catchment, a sample area of 24.7 km^2 , at a resolution equivalent to a 1:25.000 scale.

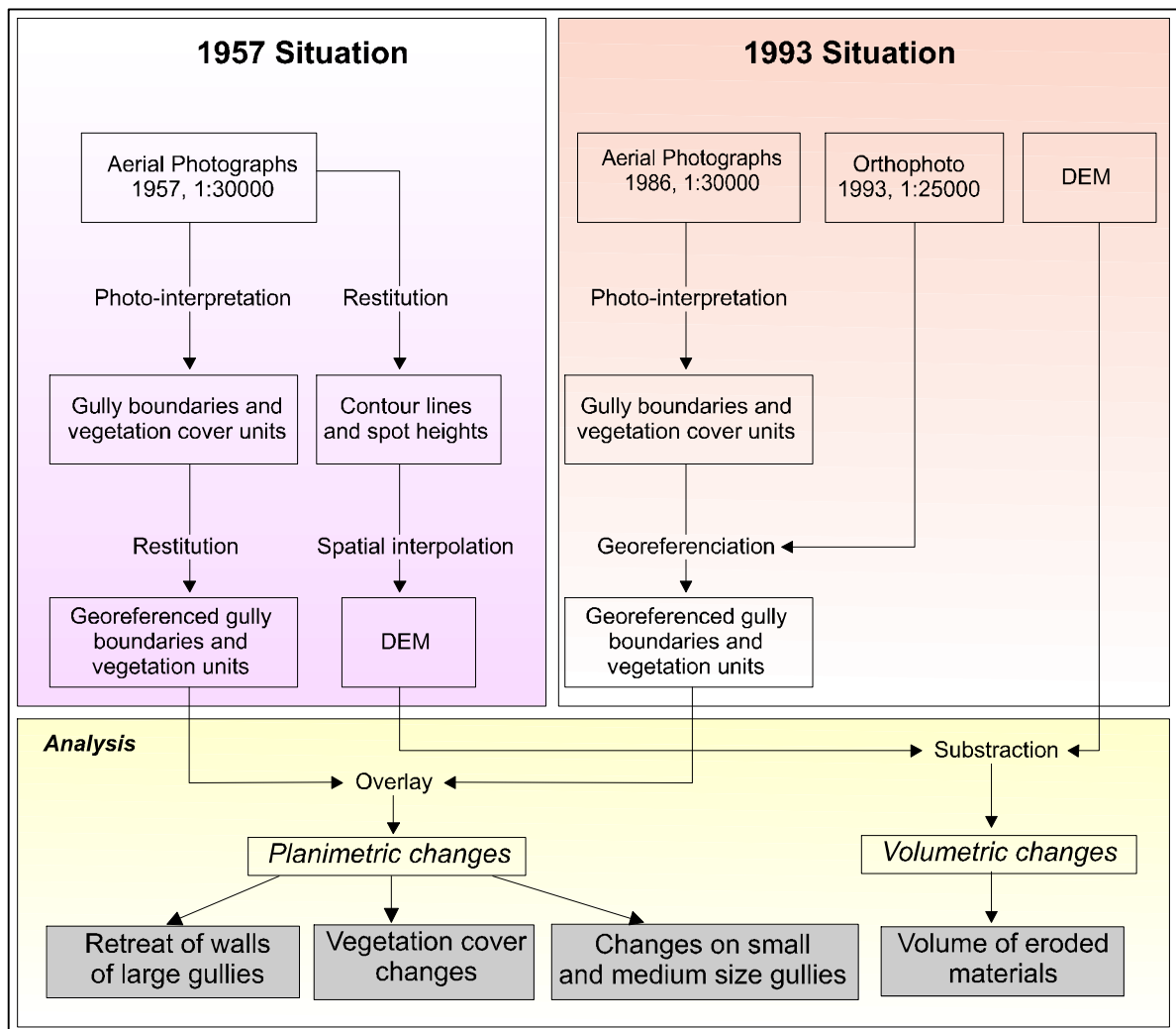


Figure 4.6. Methodological process for the analysis of changes on gullies and for the calculation of erosion rates at sub-catchment scale.

4.2.3. Assessment of the gully erosion risk

Two situations were considered with respect the mapping of gully erosion risk in the Alt Penedès - Anoia. One was the prediction of existing incipient or small gullies at parcel level, and the another was the risk of development of existing gullies.

4.2.3.1. Prediction of existing gully erosion at parcel level

The model developed by Meyer and Martínez-Casasnovas (1998, see section 5.4) was applied to the entire study area to predict the probability of existence of gully erosion at parcel level. This approach is preferred in front of the estimation of growing of existing gullies, since farmers continuously remove them after rainfalls and the amount of retreat of gullies can hardly be measured (Thomas *et al.* 1986, Meyer and Martínez-Casasnovas 1998).

The model was calculated and validated using reference data from two sample sub-catchments of the Alt Penedès – Anoia region: the Rierusa and Romaní-Bribóns catchments (24.7 km² and 28.7 km² respectively).

Equation 4.1 shows the applied logistic model.

Equation 4.1

$$p = \frac{\text{Exp} (-1.8744 + 0.8246 S - 3.2843 X - 2.0361R)}{1 + \text{Exp} (-1.8744 + 0.8246 S - 3.2843 X - 2.0361R)}$$

Where,

P = Probability of existence of gully erosion

S = Slope degree

X = Rectilinear planar form curvature

X= 1 when a rectilinear planar form curvature exists. Otherwise X= 0.

R = Convex planar form curvature

R= 1 when a convex planar form curvature exists. Otherwise X= 0.

Goodness-of-Fit value (Hosmer and Lemeshow 1989) = 0.8424

This empiric-stochastical model was implemented in the Image Calculator function of the GIS Idrisi 2.0, using the 25 m resolution DEM. The probability map was intersected with a mask of the agricultural areas. This mask was extracted from the Land cover/use map produced by multispectral classification of a Landsat TM image (Martínez-Casasnovas 1998, see section 5.2). The land cover/use classes included in the mask were: vineyards, winter cereals, bare soil parcels and grassland and shrubland. Forested areas and forested shrubland were masked out. Also, a mask including the areas with gully-prone materials was applied. The information on gully-prone materials was extracted from the soil information system of the Alt Penedès – Anoia (see chapter 3). The following lithologies were included in the mask: fine detritic deposits, calcilutites, unconsolidated sandstones and unconsolidated conglomerates. Those masks were applied to map the probability of gully development out of forested areas and areas where the lithology of the deposits is not prone for gully erosion.

Figure 4.7 summarises the methodological process applied to map the probability of existence of fully erosion at parcel level in the entire study area. The detailed process to compute and to validate the logistic model can be found in Meyer and Martínez-Casasnovas (1998).

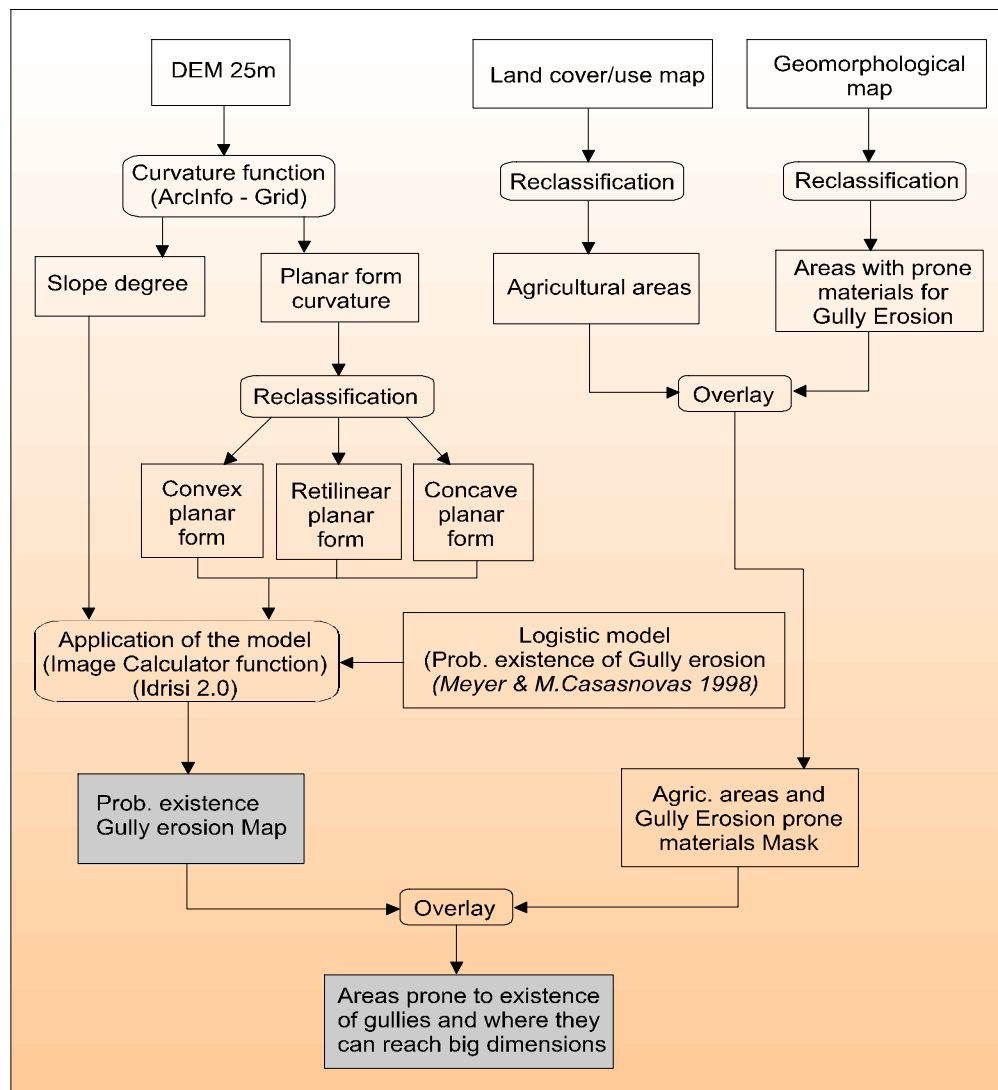


Figure 4.7. Methodological process applied to map the probable areas where small gullies exist and can reach bigger dimensions in the Alt Penedès – Anoia.

4.2.3.2. Risk of development of existing gullies

The risk of development of existing gullies was assessed by means of an evolutive knowledge based model. This model integrates the knowledge acquired during field work as well as the results of the data analysis: multi-temporal analysis of aerial photographs, terrain factors responsible for the concentration of runoff in the border of gullied areas, and distribution of gully-prone materials (derived from the soil database of the Alt Penedès – Anoia).

All those factors were integrated in a friction surface by means of a per-cell sum of the factorial scores of Table 4.3. A cost-distance function was applied from the perimeter of the gullied areas of the 1993 situation, using the calculated friction surface. The cost-distance function generates a distance/proximity surface (also referred to as a cost surface)

where distance is measured as the least effort in moving over a friction surface. The unit of measurement is a “grid cell equivalent”. A grid cell equivalent of 1 indicates the cost of moving through a grid cell when the friction equals 1. A cost of 5 grid cell equivalent might arise from a movement through 5 cells with a friction of 1, or 1 cell with a friction of 5.

Applied to the present case study, the areas that will be affected in the future by the retreat of gully heads and gully walls are predicted on the basis of the facility/difficulty they find to move through the friction surface that represents the terrain conditions prone to gully growth.

Table 4.3. Factorial scores applied to generate the friction surface used in the modelling of the development of existing gullies.

| Factor: Probability of development of new gullies (Meyer and Martínez-Casasnovas 1998) | | Factor: Exposition | |
|---|----------------|---------------------------|----------------|
| Probability class | Friction value | Exposition class | Friction value |
| 0 – 20 % | 4 | North | 0.25 |
| 20 – 40 % | 3 | East | 0.25 |
| 40 – 60 % | 2 | South | 1 |
| 60 – 80 % | 1 | West | 1 |
| 80 – 100 % | 0.25 | | |
| Factor: Gully-prone materials | | Factor: Land use | |
| Geologic material | Friction value | Land use class | Friction value |
| Fine detritic deposits | 1 | Urban/industrial | 3 |
| Calcilutites | 1 | Other | 1 |
| Unconsolidated conglomerates | 1.5 | | |
| Consolidated conglomerates | 10 | | |
| Calcic rocks | 10 | | |
| Schists | 10 | | |

The proposed evolutive model of gully wall retreat was validated by comparison of the actual measured retreat in the period 1957-1993 in the Rierusa basin and the result of the application of the model to the 1957 situation in the same basin. The predicted gully retreat area was obtained by the reclassification of the cost-distance function. The cells considered as eroded in the 1957-1993 period were those that had a low cost value and sum the same number of cells that conform the actual gully retreat areas.

4.3. Results and discussion

4.3.1. The regional perspective of gully erosion in the Alt Penedès – Anoià region

4.3.1.1. Drainage network and gully erosion

The drainage network system of the Alt Penedès - Anoià presents different characteristics in the main landscape units (Figure 4.8). The drainage system is NW–SE oriented, following the dip direction of the Tertiary deposits that fill the Penedès Depression. The drainage pattern is mainly dendritic, except for the Low dissected valley-glacis unit and the SW part of the Piedemont-glacis unit. Here, the presence of residual deposits has produced a parallel pattern with characteristic infilled valleys. The absence of residual deposits and the presence of unconsolidated calcilutites or sandstones in the High dissected valley-

glacis unit and the NW part of the Piedmont-glacis unit has produced a dendritic pattern, with a characteristic dense and deep gully network. The estimated gully-eroded volume, in the recent geologic history, reach the impressive value of 466.4 hm³, and 809.2 Tg (809.2 10⁶ Ton) of eroded materials.

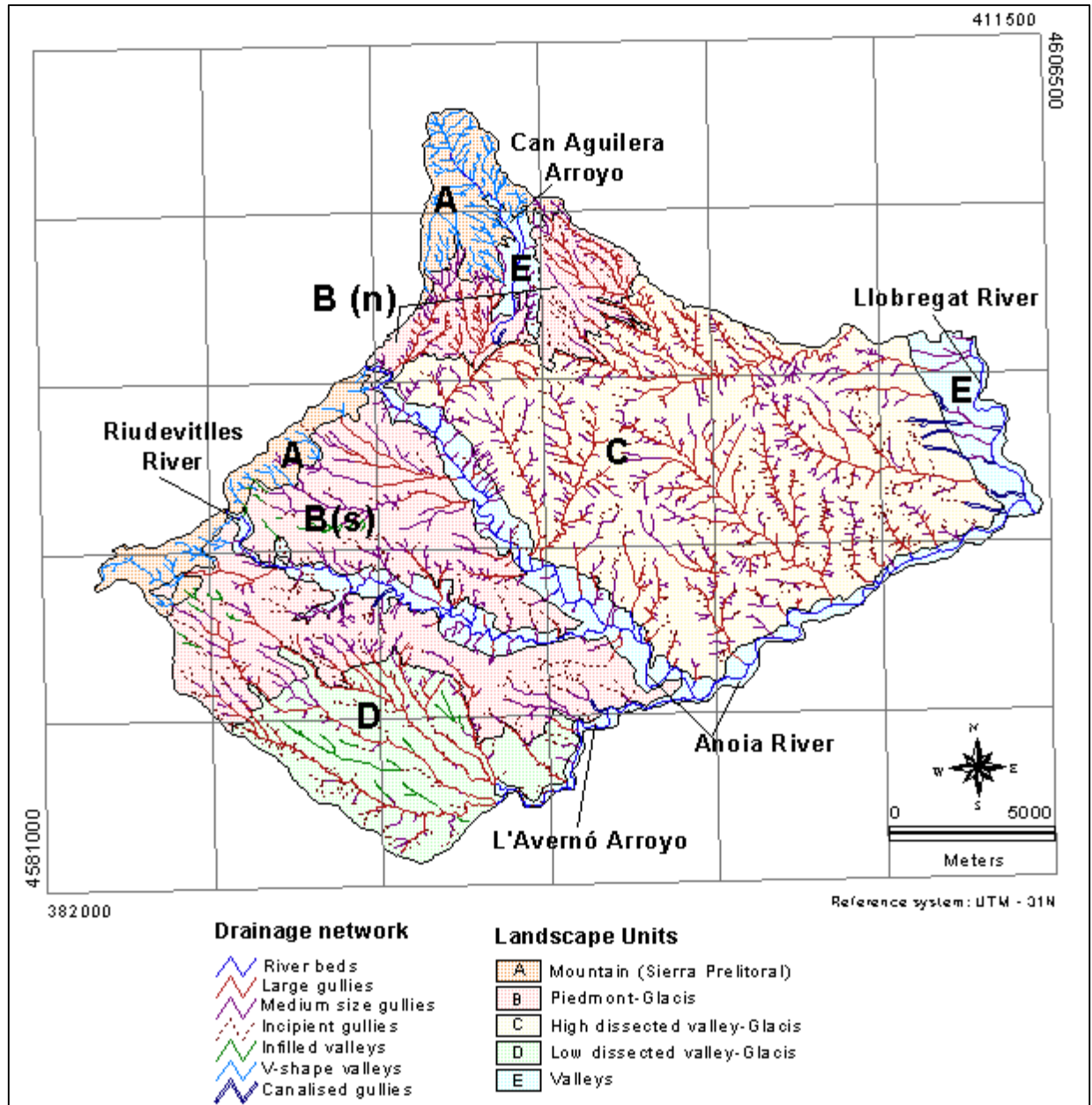


Figure 4.8. Drainage network of the Alt Penedès-Anoia region, superimposed to the main landscape units.

Although the different landscape units present similar drainage density values, with exception of the Valley landscape unit (Table 4.1), differences on the density per type of drainage element and on the gully-eroded area and volume were observed (Table 4.4).

Table 4.4. Drainage density, gully-eroded area and volume in the main landscape units of the Alt Penedès-Anoia region.

| Landscape unit | Area of the unit km ² | Type of drainage network element | Drainage density km km ⁻² | Gully-eroded area km ² (and % with respect total landscape unit) | Gully-eroded volume hm ³ (and max. gully depth m) | Relation eroded volume and area of the unit Hm ³ km ⁻² |
|----------------------------------|----------------------------------|--|--------------------------------------|---|--|--|
| A. Mountain | 21.52 | - River beds - Medium-size gullies - V-shaped valleys | 0.11 0.30 2.94 | 0 | 0 | 0 |
| B. Piedmont-Glaciis | | | | | | |
| - Northern area | 17.55 | - Large gullies - Medium-size gullies - Incipient gullies - Other | 2.94 1.29 0.53 0.15 | 5.60 (31.9%) | 52.7 (43) | 3.0 |
| - Southern area | 66.31 | - Large gullies - Medium-size gullies - Incipient gullies - Infilled valleys - Other | 0.62 1.23 0.70 0.13 0.06 | 5.19 (7.8%) | 52.1 (45) | 0.8 |
| - Total unit | 83.86 | | | 10.79 (12.8%) | 104.8 | 1.2 |
| C. High dissected valley-glaciis | 114.54 | - Large gullies - Medium-size gullies - Incipient gullies - Other | 1.77 1.02 0.58 0.04 | 27.17 (23.2%) | 326.6 (60) | 2.8 |
| D. Low dissected valley-glaciis | 33.51 | - Large gullies - Medium-size gullies - Incipient gullies - Infilled valleys | 1.64 0.37 0.80 0.34 | 5.70 (17.0%) | 28.7 (30) | 0.8 |
| E. Valleys | 39.82 | - River beds - Large gullies - Medium-size gullies - Incipient gullies - Other | 2.03 0.20 1.00 0.19 0.14 | 0.94 (2.3%) | 6.2 (45) | 0.1 |
| Total study area | 293.26 | | | 44.60 (15.2%) | 466.4 | 1.59 |

The northern zone of the Piedmont-Glaciis unit is the most gullied area. The density of gullies reaches 4.76 km km⁻². According to the classifications of Bucko and Mazurova (1958 quoted by Richter 1980) and Zachar (1982 quoted by Stroosnijder and Eppink 1993), this value indicates very severe and severe gully erosion respectively. Other authors also consider this density as high (Meijerink 1988, Hernández 1991). The area affected by large gullies is 31.9 % of the total sub-landscape unit. According to the classification of Zachar (1982, quoted by Stroosnijder and Eppink 1993), this value confirms the very severe gully erosion. The total eroded volume is 52.7 hm³ and the ratio eroded volume/landscape unit area of 3 hm³ km⁻². Different values of density and eroded area are observed in the southern zone of the Piedmont-glaciis unit, 2.55 km km⁻² and 7.8 % respectively (severe gully erosion according to Zachar 1982, quoted by Stroosnijder and

Eppink 1993), with a similar eroded volume but low eroded volume in relation to the total area ($0.8 \text{ hm}^3 \text{ km}^{-2}$). The difference lies in the limited development of large gullies due to the control performed by the consolidated conglomerates that fill this part of the Tertiary depression. Some large gullies have grown in the lower parts of the slopes that connect with the valleys of the main rivers where calcilutites crop out (Figure 4.8). The density of medium-size and incipient gullies is similar in the north and south areas of the landscape unit, 1.29 and 1.23 km km^{-2} respectively. However, the risk of expansion of these gullies is much higher in the northern area because of the lack of structural control of the deposits.

The High-dissected valley-glacis unit, which connects with the northern area of the Piedmont-glacis, is also highly affected by gully erosion. The area is very severely eroded. Large gullies occupy 23.2 % of the total landscape unit. This value is similar to the measured by Porta *et al.* (1994) in a sample area of this unit. Gullies reach a depth of 60 m in some areas, and the unit presents the second highest ratio between the eroded volume and the total area, $2.8 \text{ hm}^3 \text{ km}^{-2}$. The density of medium-size gullies is relatively high (1.02 km km^{-2}) and the density of incipient gullies moderately low (0.58 km km^{-2}). This does not mean the growth of the gully network and erosion in this area is in recess. The dominant land use type, vineyards with modern agricultural techniques, has involved big transformation of parcels to reduce slope degrees and to increase parcels size, in order to facilitate mechanisation. This, together with the continuous tilling to avoid weeds between vine rows, and the ephemeral protective measures they implement in the contact between parcels and large or medium-size gullies, apparently control gullies do “as they please” in this landscape unit.

The Low dissected valley-glacis unit has a similar density value of large gullies (1.64 km km^{-2}) as the High dissected valley-glacis unit. The area affected by large gullies is quite less (17.0 %), although it is also classified as very severely eroded in the classification of Zachar (1982, quoted by Stroosnijder and Eppink 1993). The eroded volume also is lower than in the High dissected valley-glacis (Table 4.4). The majority of large gullies developed in this unit seem to be inherited arroyos, that have excavated steep side trenches into recent valley sediments and into the underlying Tertiary calcilutites and sandstones, because of an abrupt lowering of the base level of the depression. A relative high density of incipient gullies was measured (0.8 km km^{-2}), particularly in the southern area of the unit, where the highest slope degrees are found. Infilled valleys are characteristic of this landscape unit. These constitute the drainage network of the gentlest slopes. At present, incipient gullies and some medium-size gullies are observed in the last sections (near the outlet) of former infilled valleys. Those have grown from the outlet of valleys by headcutting and deepening in the deep soils of the infilled valleys, taking advantage of the difference in height between the valleys and the base of the large gullies. Therefore, the infilled valleys of this landscape unit are today one of the main ways of expansion of the gully network.

The valleys of the main rivers also show an incipient problem of gully erosion. Some large gullies cut the terraces of the Riudevittles and Anoia rivers and medium-size gullies are frequent in this unit. The growth of gullies in the terraces is mainly related to the drainage of slopes in adjacent landscape units. The low density of incipient gullies confirms this fact. Deepening of gullies in the terraces is favoured by the relative height of these landforms with respect to the river beds.

All those values of drainage density and gully-eroded area and volume should be considered as indicative of the past erosion rather than present erosion (Morgan 1979). On the other hand, other authors, as Strömquist *et al.* (1986 quoted by Giordano and Marchisio 1991), Bergsma (1982), Zachar (1982 quoted by Stroosnijder and Eppink 1993), consider those parameters as reliable erosion ones. In this research, those parameters should be understood as indicative of past erosion but they are also indicative of present activity of the ongoing gulling process, since there are field evidences (later studied) that confirm it.

4.3.1.2. Analysis of gully morphology

Some authors have emphasise the importance of the gully morphology as one of the first steps in evaluating gully processes and as a link between past, present and future gully erosion (Ireland *et al.* 1939, Heede 1970, Imeson and Kwaad 1980, Bergsma 1982, Crouch and Blong 1989).

Differences on planar form of large gullies and on cross-sectional shapes were found in the different landscape units in the Alt Penedès – Anòia. Those differences are mainly related to the lithological properties of the materials the gully network cuts. Table 4.5 summarises the dominant planar form of gullies and the degree of crenelation of the gully perimeter in the different landscape units. Figure 4.10 and Figure 4.11 show the results of the cross-sectional shapes of the large gullies indicated in Figure 4.9.

Table 4.5. Dominant planar form and degree of crenelation of the gully perimeter in the landscape units.

| Landscape Unit | Planar form | Crenelation |
|------------------------------|---|--------------|
| Piedmont-glacis (North) | Bulbous and dendritic | High |
| Piedmont-glacis (South) | Dendritic, few branched Linear in some areas | Low |
| High dissected valley-glacis | Dendritic Bulbous in some confluence areas | High |
| Low dissected valley-glacis | Linear, very few branched | Low – medium |
| Valley | Linear or dendritic | Low – medium |

The planar surface of the gully-eroded area, 44.6 km², and the cross-sectional dimensions of the mapped large gullies, between 13 – 56 m depth and 75 – 450 m width, can be a first indication of the magnitude of the studied phenomena.

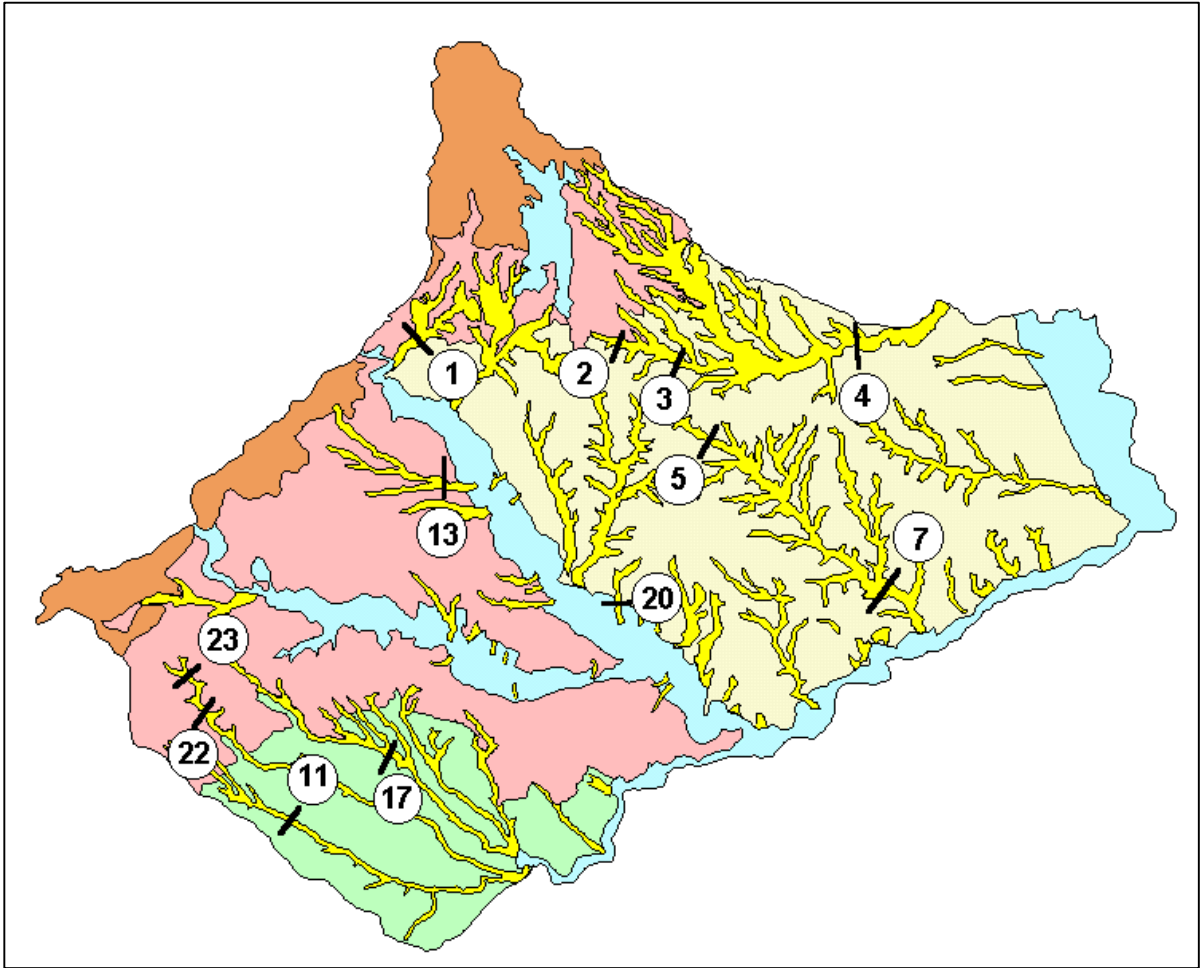


Figure 4.9. Location of the cross-sectional shapes referred in Figure 4.10 and Figure 4.11.

The gullies of the northern area of the Piedmont-glacis unit and the High dissected valley-glacis unit present morphologies and degrees of crenelation associated to a high erosional activity. They are the deepest of the study area, with average values of 11-13 m and maximum of 40-60 m. The retreat of gully walls is not controlled by consolidated materials, and gullies have a high degree of lateral expansion in relation to head retreat or linear advance. The high degree of crenelation is due to the frequent failure of gully walls and the retreat of gullies towards the drainage ways of parcels. The materials that fall off from the walls are usually removed by flowing water after high intensity rainstorms. In other cases, they are deposited in the gully bottom and may lead to some degree of stabilisation of the sidewalls. The cross-sectional shapes of the gullies is typically V to U-shaped or U-shaped. The last forms are usually found in the sections near the outlets of main branches (Figure 4.10, cross-sections 1 and 7). V to U-shaped gullies are found in intermediate sections of the gully network (Figure 4.10, cross-sections 3, 4 and 5). These gullies show a tendency to reach the U-shape, by means of processes as mass movements. V-shaped gullies, which reveal a more initial development stage and a higher rate of deepening in relation to linear retreat, are found in some gully heads (Figure 4.10, cross-section 2).

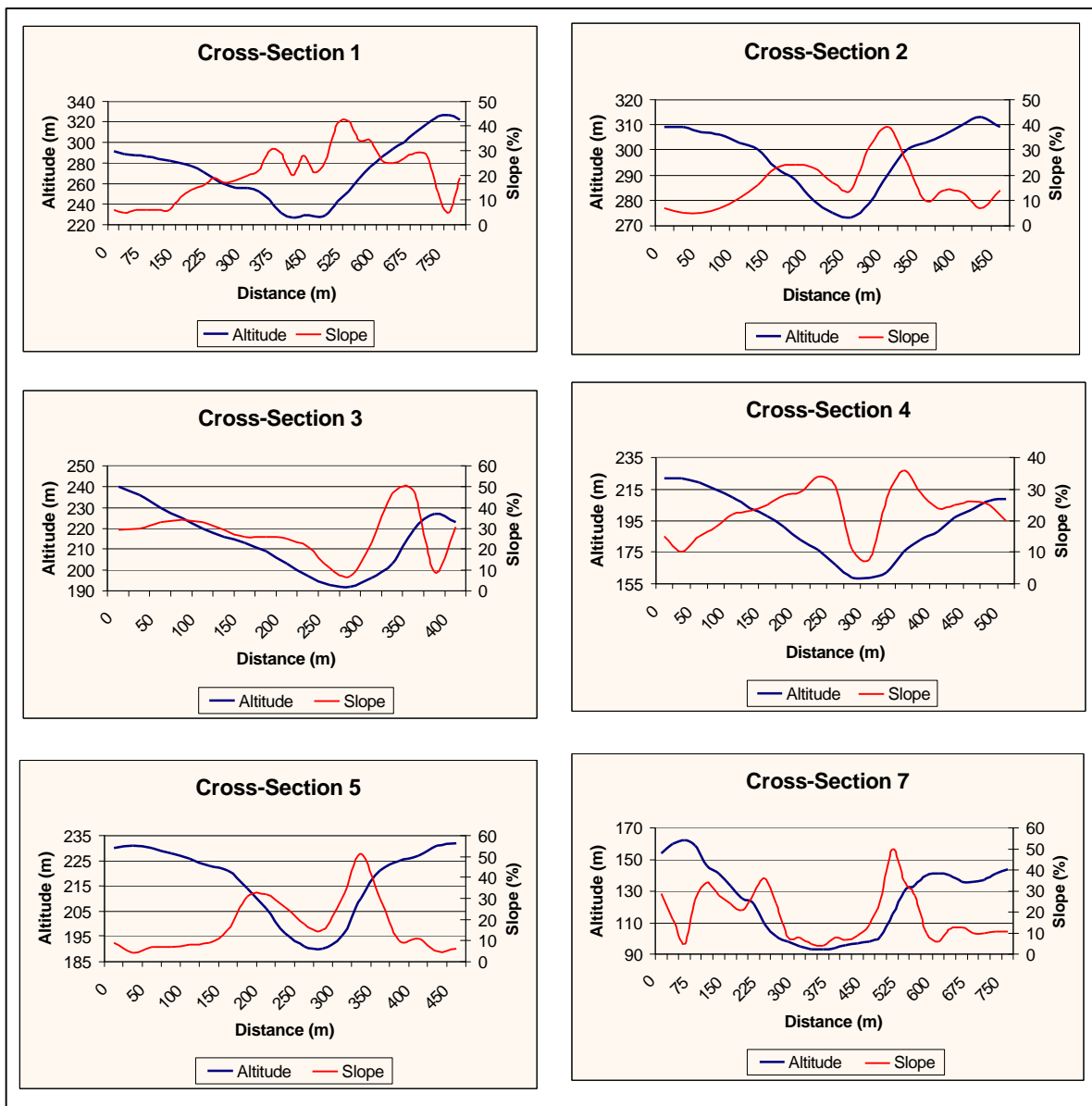


Figure 4.10. Cross-sectional shapes of large gullies in the northern area of the Piedmont-glacis unit and the High dissected valley-glacis unit indicated in Figure 4.9.

In the southern area of the Piedmont-glacis unit, gullies are few branched and less crenelated. This reveals a lower lateral retreat activity of gully walls. This is mainly due to the control produced by the conglomerates of the Riudevilles river (Gallart 1980). The gullies have similar depths that in the northern area of the unit. Cross-sectional shapes are typically between V and U, with more rounded concave breaks in gully bottoms (Figure 4.11, cross-sections 13 and 23). Sections near the heads are V-shaped bottoms (Figure 4.11, cross-section 22).

The gullies developed in the Low dissected valley-glacis unit have a linear planar form, with very few branches. They are trenches excavated in the valley of existing water courses, with origin in the near mountains. These gullies are similar to the Type 4 of gullies as described by Imeson and Kwaad (1980). The typical cross-sectional shape is the

U-shape (Figure 4.11, cross-section 11 and 17). The main process controlling the retreat of sidewalls is bank erosion. Branches are scarce in the central part of the unit, which has low slope degrees, and they increase in the north and south borders of the unit, where slope degrees are higher. The average depth is around 6-8 m, much less than in the previously mentioned units, although in some sections gullies are up to 30 m depth.

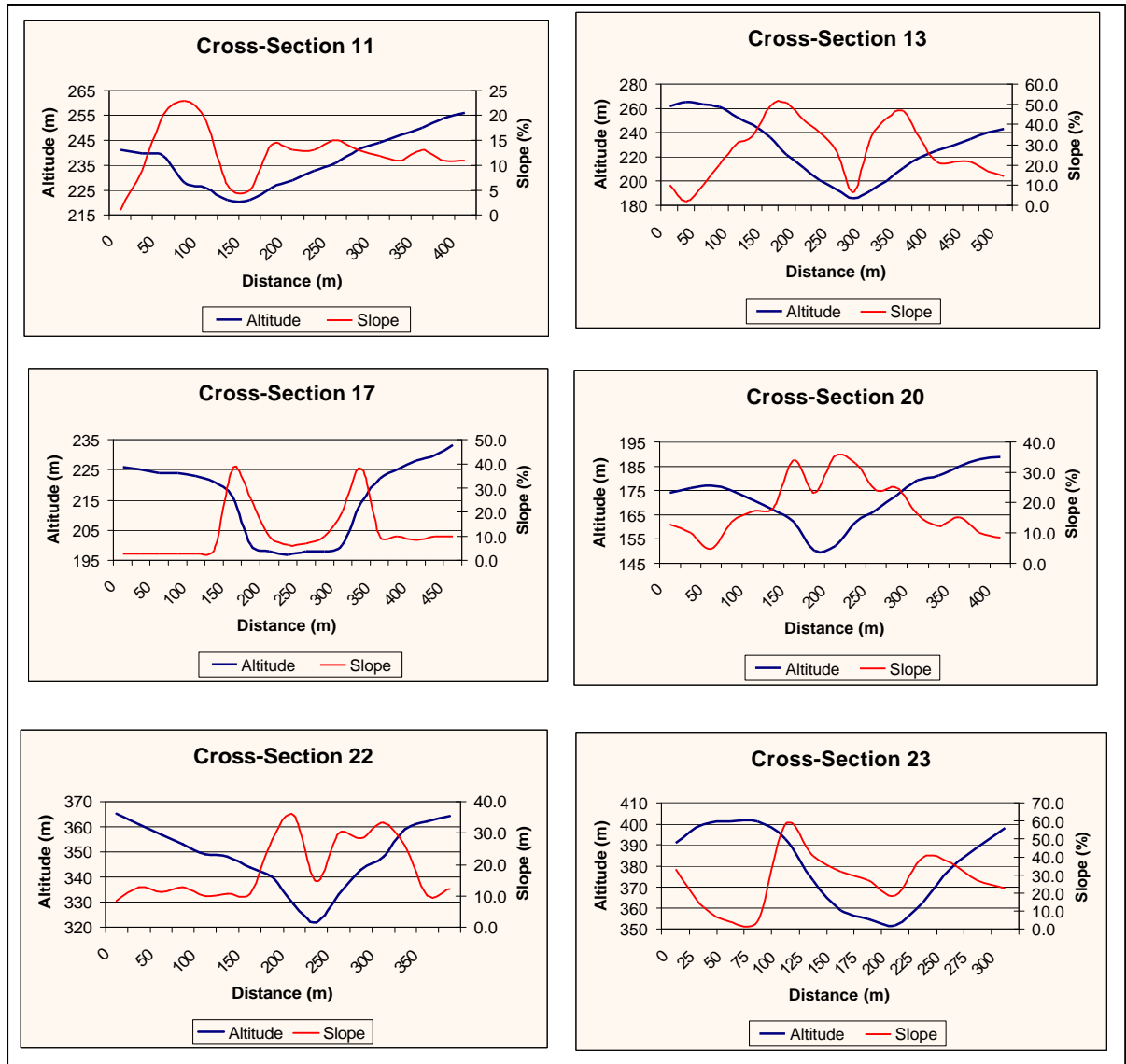


Figure 4.11. Cross-sectional shapes of the large gullies in the southern area of the Piedmont-glacis, Low dissected valley-glacis and Valley units indicated in Figure 4.9.

The gullies that cut the terraces of the Valley landscape unit have similar cross-sectional shapes as the above mentioned valley trenches, with an average depth of 8-10 m and maximums of 45 m (Figure 4.11, cross-section 20). They are short gullies, which have linearly retreated until the border of the terraces. In some cases they are advancing through the adjacent slopes where Tertiary calcilutites crop out.

Some relevant observations can be drawn from the analysis of the longitudinal-sections of the main rivers and tributaries in the study area (Figure 4.12). The base level of the area is in the confluence of the Llobregat and Anoia rivers (50 m over the sea level). Most of the gullies of the study area have they reference local base level in their confluence with the Anoia river or with one of its main tributaries (Riudevittles river or Avernó arroyo). The gullies of the High dissected valley-glacis unit (Rierusa, Torres or Carrol), present a less stabilised profile than the gullies and arroyos of the Low dissected valley-glacis unit (Avernó, Romaní or Rovira). However, gullies that have reached the slopes of the border area of this last landscape unit (head of Rovira and Tarumbas) show a profile similar to Rierusa, Torres or Carrol, indicating the higher potential for erosion in those areas (Figure 4.12).

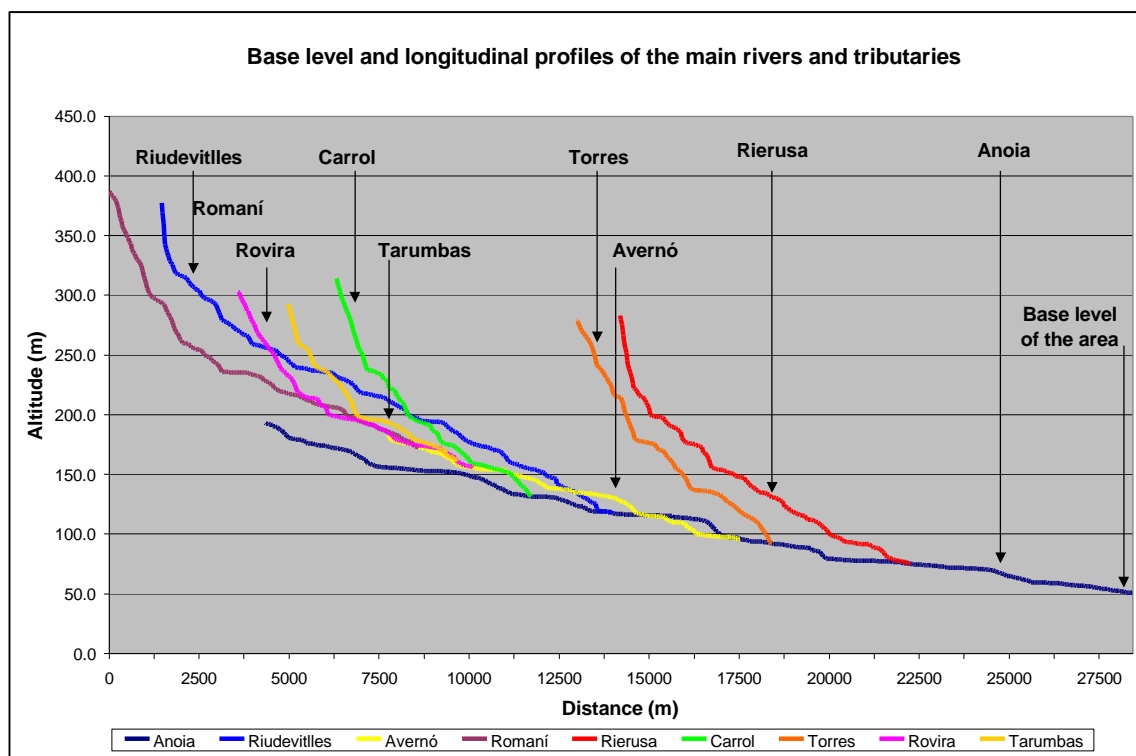


Figure 4.12. Base level and longitudinal profiles of the main rivers and tributaries in the study area.

In summary, the morphological analysis of the gully network of the study area reveals several important facts. First, and as it is recognised in geomorphology (Chorley 1969, Dunne *et al.* 1984, Van Zuidam 1985, Mulders 1987), the drainage network has developed in response to the erosive forces acting on the erodible materials that comprise the study area. The differences in drainage density and pattern among the landscape units mainly reveal differences in the underlying geologic deposits. Dendritic patterns are found where calcilutites are the main underlying materials, and parallel patterns where conglomerates perform a structural control.

Second, all the landscape units, except the Sierra Prelitoral mountains, present gully erosion. The highest degrees of erosion are found in the northern area of the Piedmont-glacis unit and in the High dissected valley-glacis unit. The lowest degree of gully erosion

is found in the Valley unit. According to Zachar (1982 quoted by Stroosnijder and Eppink 1993), the degree of erosion in this last unit can be qualified as moderate. Nevertheless, terraces are frequently cut by gullies, being landforms with a high gully erosion risk.

Third, the landscape unit with the highest density of incipient gullies is the Low dissected valley-glacis. This, together with the observed incision of gullies in the infilled valleys, confirm the progression of gully erosion and a high present erosional activity in this unit. Particular attention must be paid to the development of gullies in the higher slope degree bordering areas.

And fourth, the analysis of the cross-sections revealed the main part of the gullies of the study area are in a stage of adjustment and remoulding of slopes by mass movements, circular slips, bank erosion, etc. The northern area of the Piedmont-glacis unit and the High dissected valley-glacis unit present the morphologies of gullies associated to a higher erosional activity. Also the longitudinal-sections of gullies in those areas are the less stabilised, indicating a higher potential for erosion. The land use types that exist in the area could significantly influence gullies do not reach a stable stage. Surface and sub-surface hydric processes that occur in the parcels feed the ongoing gully erosion processes, avoiding the stable stage is reached.

4.3.1.3. Erosional activity of the walls of large gullies

The major part of the gully-eroded area, 62.7% of the total eroded area, presents a vegetation of the type mixed forest or forested shrubland, with >60% vegetation cover (Figure 4.13). Those areas were classified as Semi-active – Stable (Figure 4.15). The 26.4% of the gully eroded area was classified as Active – Semi-active (bare walls or walls with a low coverage of grass and shrubs) (Figure 4.14).

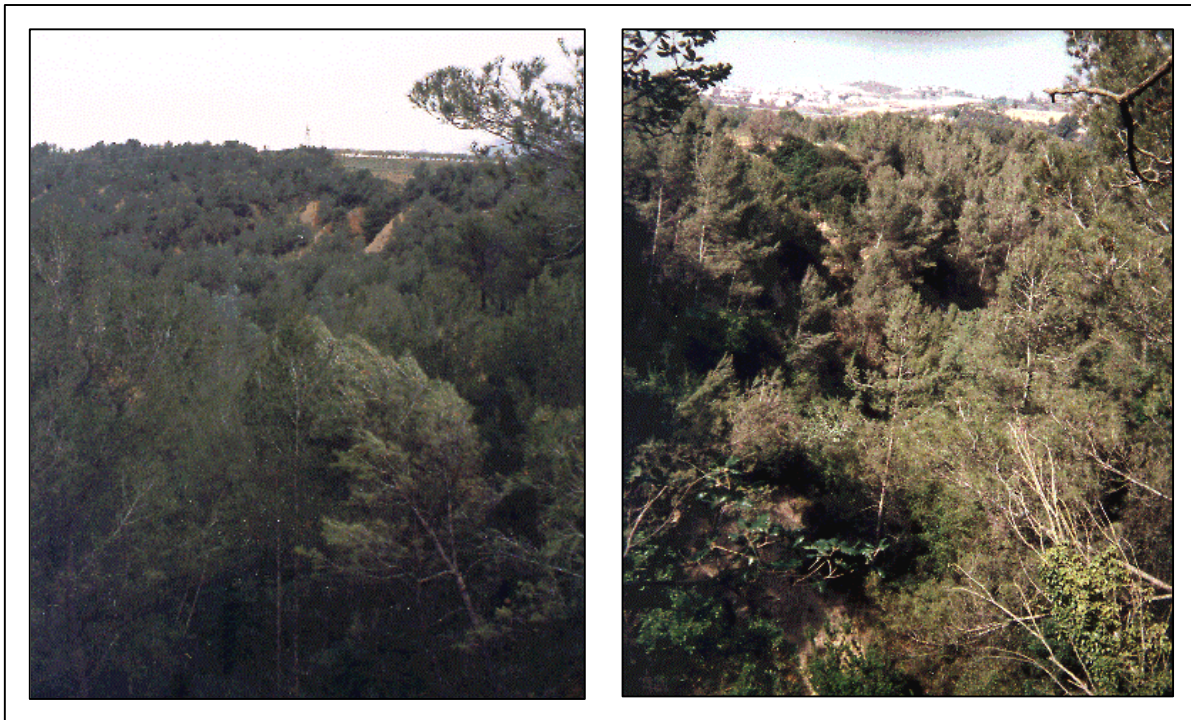


Figure 4.13. Examples of gully walls classified as Semi-active – Stable (> 60% vegetation cover).



Figure 4.14. Examples of gully walls classified as Active – Semi-active (< 40% vegetation cover).

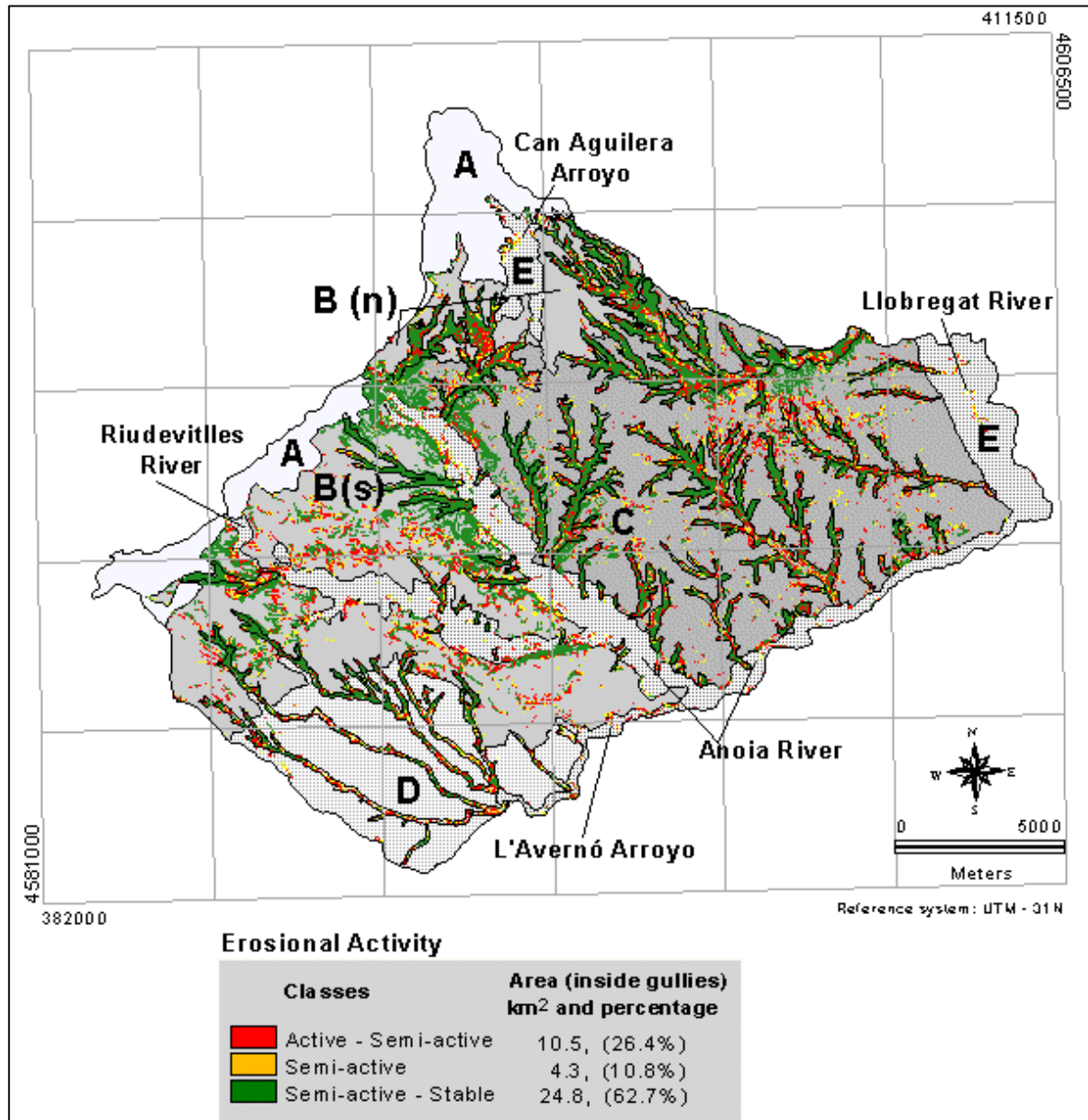


Figure 4.15. Erosional activity of gully walls and other areas >20 % slope degree.

According to different authors (Ireland *et al.* 1939, Morgan 1979, Bergsma 1982, Crouch and Blong 1989) gullies can be considered as stable when, after a period of remoulding of the walls by slope wash and mass movements, walls reach partially or fully vegetated. In the present case study, this is for sure one of the first conclusions one can arrive to from the above mentioned results: the major part of the gully-eroded areas are stable or tend to the stabilisation. However, several types of erosion processes were identified during the field work and were associated with the different erosional activity classes (Table 4.6).

Table 4.6. Erosional activity class and main erosion processes on gully walls in the Alt Penedès – Anoia region.

| Erosional Activity Class | Erosion Processes on Gully Walls |
|--------------------------|---|
| Active – Semi-active | <ul style="list-style-type: none"> - Splash erosion and sheet erosion - Bank erosion and wall failure by toppling - Fluting (created by incision of small gullies on the sidewalls) |
| Semi-active | <ul style="list-style-type: none"> - Splash erosion and sheet erosion (lower intensity of processes than for the Active – Semi-active class) - Bank erosion and wall failure by toppling - Fluting (created by incision of small gullies on the sidewalls) |
| Semi-active - Stable | <ul style="list-style-type: none"> - Bank erosion and wall failure by toppling - Circular slips - Caving due to soil saturation - Undercutting by parcels' drainage flows |

The areas classified as Semi-active – Stable are liable to the actuation of processes as wall failure or circular slips, that can reactivate erosion on sidewalls and contribute to the lateral expansion of gullies (Figure 4.16).

A greater part of this problem has its origin in the vineyard parcels. The drainage system of the parcels concentrates the flow in few outlets. Water is conducted up to the border of gullies. The free fall of runoff water during high intensity precipitation events undercuts the base of gully walls and produces the wall failure (Figure 4.17). Accumulation of runoff at gully bordering areas produces soil saturation in other cases. This later favours circular slips (Figure 4.18), that result on the retreat of gully walls.



Figure 4.16. Processes in the gully borders that contribute to the lateral retreat of gullies. Example of a circular slip.



Figure 4.17. Outlet of a drainage channel in a vineyard parcel that has produced a retreat of the gully wall by direct impact of water flow and undercutting of the wall.



Figure 4.18. Left: Fissure produced in border between a parcel and a gully. Right: Slip that produces gully wall retreat.

The assessment of the erosional activity on the basis of vegetation cover on gully walls can produce in these cases default results. The existence of vegetation cover mainly avoids sheet erosion, so soil losses decrease on sidewalls, but it does not imply gullies stop growing and branching since other processes occur. Those processes could not be detected from medium resolution remotely sensed data (Landsat TM data), nor inferred from the image. Complementary field observations were necessary to detect them. The applied method was nevertheless useful to locate the areas of highest sheet erosion on gully walls activity: badlands and non-vegetated sidewalls (Figure 4.15).

Significant differences ($P < 0.01$) were found in the test of the spatial distribution of the erosional activity classes with respect to the landscape units (Table 4.7). The walls of the gullies cutting the Piedmont landscape unit presented higher proportion of the Semi-active – Stable class (particularly in the southern sub-landscape unit). On the contrary, the Low dissected valley-glacis unit presented the major proportion of areas classified as Active – Semi-active. This is interpreted as a relative higher activity of gully erosion in this unit, that agrees with the relative high density of incipient gullies that was measured and with the gully growth in infilled valleys observed during field work.

Table 4.7. Chi Square (X^2) test between erosional activity classes and landscape units. Differences between the distribution of observed and expected frequencies.

| Erosional Activity Class | Landscape Unit | | | |
|--|----------------|------------------------------|-----------------------------|---------|
| | Piedmont | High dissected valley-glacis | Low dissected valley-glacis | Valleys |
| Active – Semi-active | -6.57 | -1.58 | 7.18 | 0.96 |
| Semi-active | -4.88 | -4.16 | 7.89 | 1.16 |
| Semi-active – Stable | 11.45 | 5.74 | -15.08 | -2.12 |
| X^2 value = 17.93 X^2 (P = 0.05) = 12.59 X^2 (P = 0.01) = 16.81 Significant differences exist with $P < 0.01$. | | | | |

The analysis between the erosional activity classes and topographical variables (slope and exposition) in the gully eroded areas showed a lack of significant relationships (Table 4.8).

Table 4.8. Relationships between the erosional activity classes and topographical variables in the gully eroded areas.

| | Gully wall erosional activity | Landscape unit | Slope degree |
|--------------------------------------|---|---|--|
| Gully wall erosional activity | — | — | — |
| Landscape unit | X ² value = 17.93 ** X ² (P = 0.05) = 12.59 X ² (P = 0.01) = 16.81 Piedmont has higher relative % of SA – S class. Low dissected has higher relative % of A – SA class. | — | — |
| Slope degree | X ² value = 9.54 X ² (P = 0.05) = 15.50 X ² (P = 0.01) = 20.09 Tendencies: Slopes >40% ⇒ SA - S Slopes <20% ⇒ A - SA | X ² value = 46.47 ** X ² (P = 0.05) = 21.02 X ² (P = 0.01) = 26.21 Piedmont and High dissected has higher slope degrees. Low dissected has lower slope degrees. | — |
| Exposition | X ² value = 4.43 X ² (P = 0.05) = 12.59 X ² (P = 0.01) = 16.81 Tendencies: A – SA, SA ⇒ South SA – S ⇒ Noth | X ² value = 12.40 X ² (P = 0.05) = 16.91 X ² (P = 0.01) = 21.66 Tendencies: High dissected ⇒ North Low dissected ⇒ West Valley ⇒ East | X ² value = 7.23 X ² (P = 0.05) = 21.02 X ² (P = 0.01) = 26.21 Tendencies: Slope <10% ⇒ South Slope >40% ⇒ North |

** Significant with a P<0.01; SA – S: Semi-active – Stable; A – SA: Active – Semi-active

The lack of a logical and expected relationship between the activity classes and variables as the slope degree or the exposition of the eroded areas is be interpreted as gully growth is an active and dynamic process in the study area. The most stable walls usually present a stability that can be broken in a given moment by wall failures, circular slips, undercutting of the walls, etc. This does not depend on the vegetation cover or topographic characteristics as much as erosional processes that are originated by the type of use of the neighbour agricultural parcels (crops, management practices and erosion control measures).

4.3.2. Gully change analysis and estimation of erosion rates at sub-catchment scale

4.3.2.1. Changes in small and medium-size gullies: 1957 – 1993

The results of the change analysis of small and medium-size gullies in the period 1957 – 1993 in the Rierusa catchment show an apparent reduction of 9 km in the total mapped length of gullies (Figure 4.19). Without any other knowledge about the study area, it could be interpreted as gullied areas had been regenerated. The reality is however quite different. Two are the main reasons for this apparent regeneration. One of them is the lateral retreat of some small and medium-size gullies, which in the 1993 situation were mapped as area features (Figure 4.20). This supposes a reduction of 3.6 km of the total mapped length. But the main reason is the filling of gullies by farmers as a consequence of levelling and soil movements produced to achieve bigger parcels (Figure 4.21). The total length of filled gullies is difficult to estimate, since also new gullies appeared.

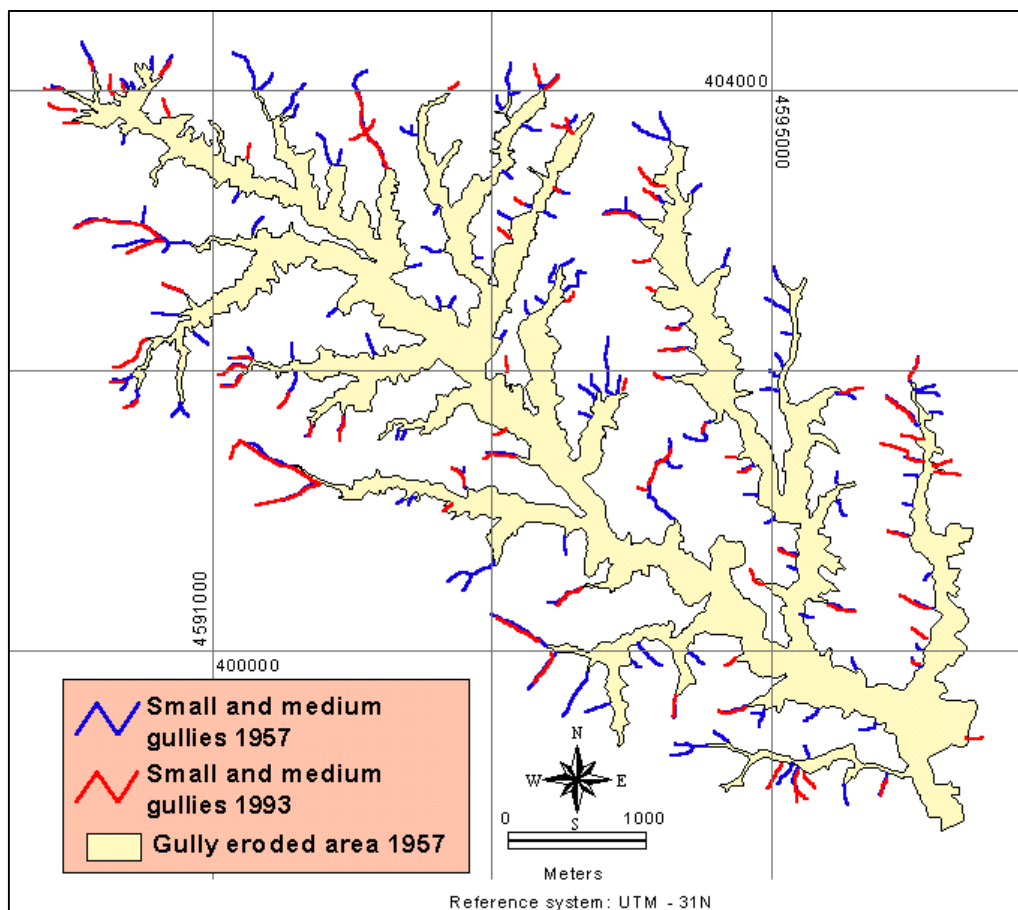


Figure 4.19. Small and medium-size gullies in the Rierusa catchment: 1957 and 1993 situations.

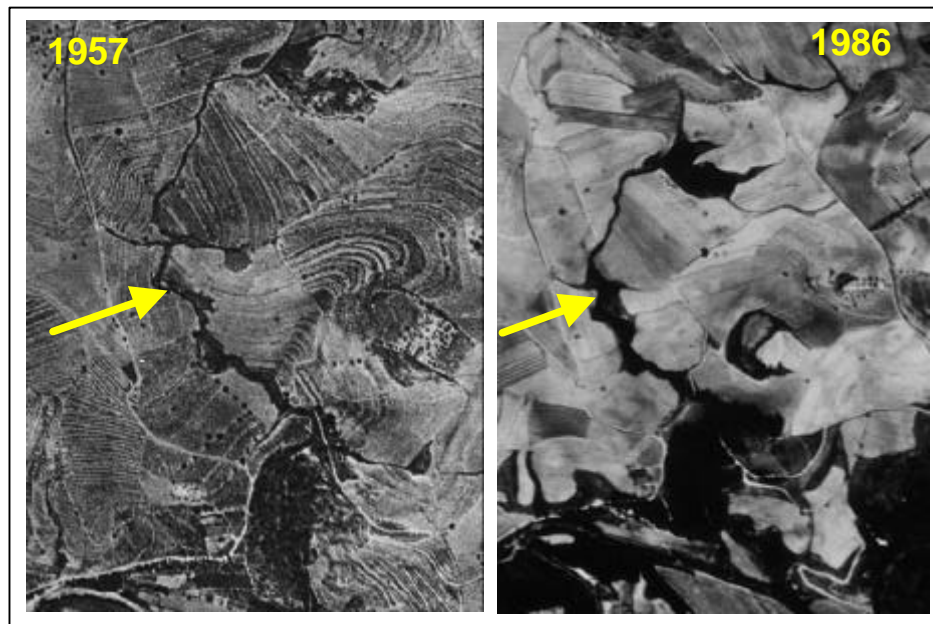


Figure 4.20. Example of lateral retreat of a gully that makes the gully is represented as an area feature in the 1993 situation.

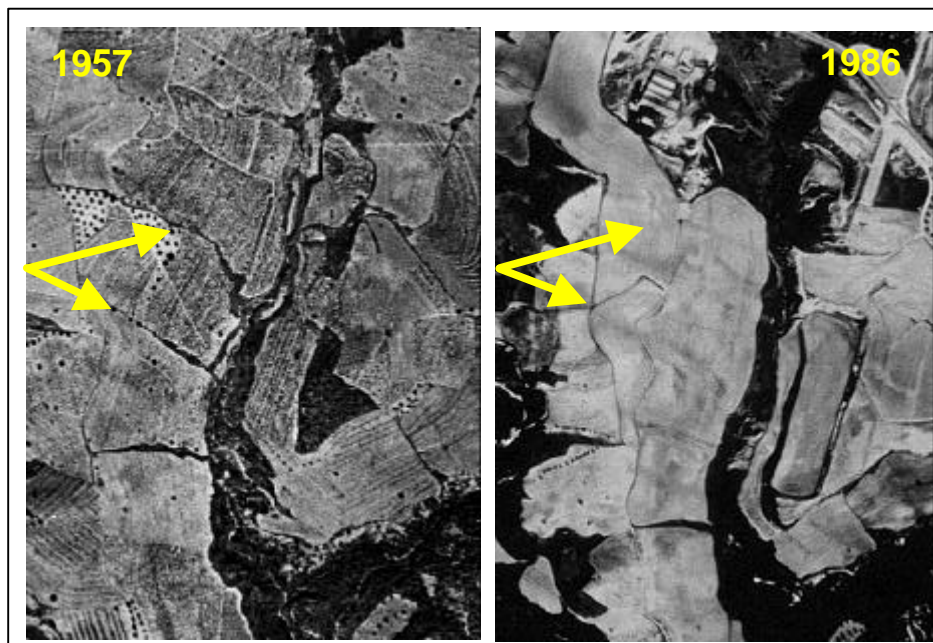


Figure 4.21. Filling of gullies as consequence of the levelling of the parcel.

In the studied period, the most active areas were the main head of the Rierusa gully, the area of the Maset – Mas Bernich, the area of Torrentfondo – Cal Pujades and the area of Sant Joan Samora (Figure 4.22). Of those, the area of Torrentfondo – Cal Pujades experimented one of the most significant changes. This gully is capturing the neighbour catchment to its west and presented a fast linear retreat. In the middle term, it makes this area presents one of the highest degrees of erosion risk.

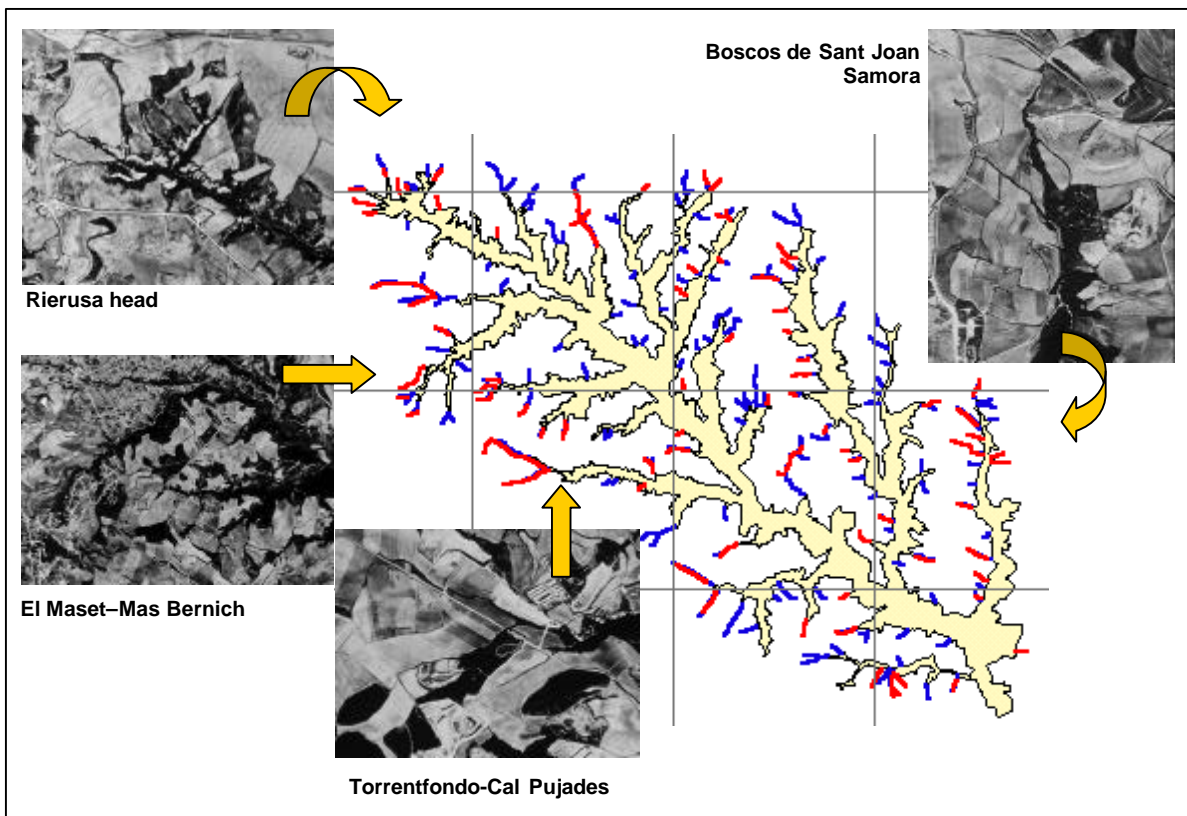


Figure 4.22. Main active areas of gully erosion (small and medium-size gullies) in the studied period.

The mapping of the changes occurred on small and medium-size gullies in the considered period has given unexpected results. These mainly attend to human intervention. At present, it is quite rare to find small gullies as permanent features in agricultural parcels. After high intensity precipitation events, ephemeral gullies, that are formed wherever runoff is concentrated (artificial terraces, drainage channels or small concave areas within parcels), are immediately removed by tillage operations. Gully erosion exist, new gullies would grow but farmers usually avoid their establishment as permanent features. This also has been argued by other authors as a problem to monitor the growth of small gullies in agricultural parcels (Thomas *et al.* 1986). Therefore, the monitoring of gully erosion in the study area, with an intensive mechanisation, is a difficult task and it makes no sense to predict ratios of linear retreat of gullies as a tool for decision making on gully erosion control. This is one of the main reasons that later influenced the establishment of an approach for gully erosion modelling at parcel level on the basis of the probability gully erosion occurs in a parcel above the prediction of retreat of existing small gullies.

Provided that farmers only use to remove ephemeral gullies within their own parcels, gullies take advantage of no-man's land to grow, where the runoff of the parcels is often concentrated,. Then, boundaries between parcels or properties or between parcels and pathways are places where gullies growth, without very much man intervention. At present, these places constitute the main ways of linear retreat of the gully network (Figure 4.23).



Figure 4.23. Left: ephemeral gully formed during a high intensity precipitation event and that is later removed by tillage operations. Right: Gully developed in the border of a parcel that is periodically filled.

4.3.2.2. *Changes in large gullies and rate of gully wall retreat (1957 – 1993)*

As result of the interpretation of aerial photographs of the two situations, each land cover/use maps were produced (Figure 4.24). These maps show important changes have occurred in the inside gullied areas during the considered period. The most important changes were the increasing of the vegetation cover and the abandon of agricultural uses on high slope degree areas. The overlay of the land cover/use maps of the inside gully areas in the 1957 and 1993 situations allowed the spatial analysis of changes. The results of the analysis are summarised in the matrix of changes (Table 4.1).

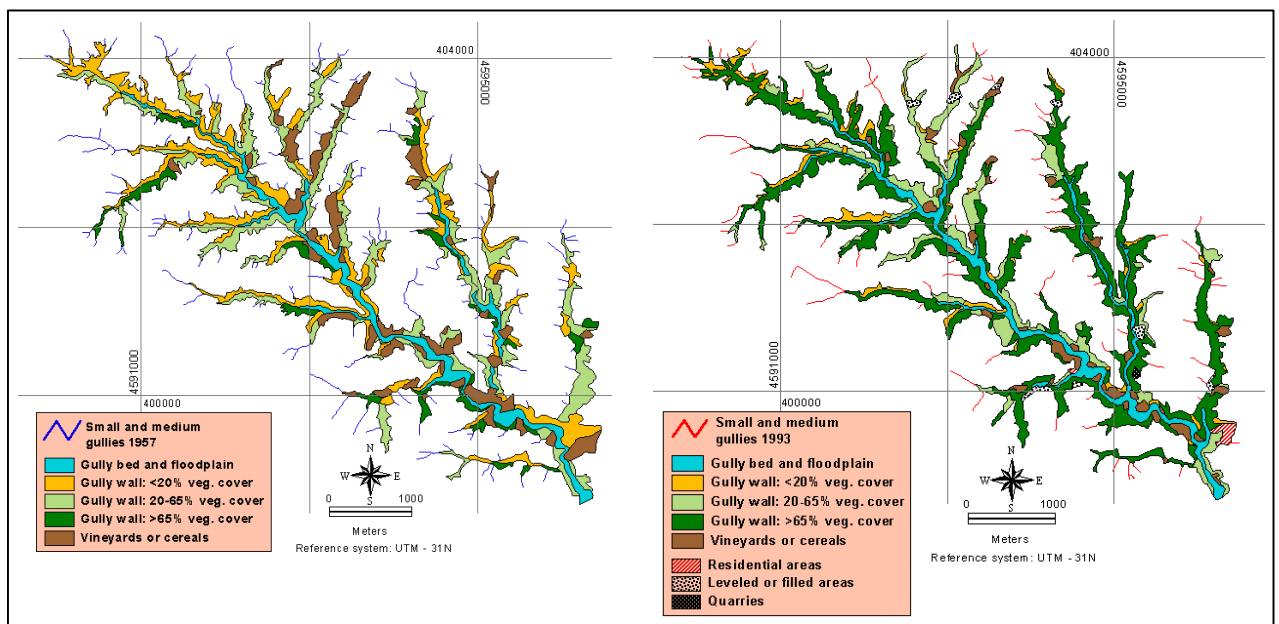










Figure 4.24. Land cover/use maps of the inside gullied area in the Rierusa catchment. Left: 1957, right: 1993.

Table 4.9. Matrix of changes occurred in the gullied areas of the Rierusa catchment in the period 1957 – 1993, (hectares).

| | 1957 (hectares) | | | | | | |
|-------------------|-----------------|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|
| 1993 (m2) | No Eroded | Gully bed | <20% v.c. | 20-65% v.c. | >65% v.c. | Crops | Total 1993 |
| No Eroded | | 0 | 15.52 | 12.49 | 2.72 | 8.08 | 38.80 |
| Gully bed | 0.80 | 64.96 | 6.31 | 6.53 | 1.86 | 6.12 | 86.58 |
| <20% v.c. | 5.11 | 0.26 | 33.06 | 3.41 | 0.24 | 2.66 | 44.73 |
| 20-65% v.c. | 20.83 | 4.06 | 37.59 | 24.97 | 1.15 | 36.75 | 125.34 |
| >65% v.c. | 42.70 | 9.64 | 76.88 | 134.26 | 42.69 | 20.59 | 326.77 |
| Crops | 3.04 | 2.78 | 2.96 | 7.60 | 0.15 | 25.79 | 42.31 |
| Residential | 0.18 | 0 | 2.50 | 0 | 0 | 2.58 | 5.25 |
| Level | 2.99 | 0.50 | 1.45 | 3.18 | 0.29 | 1.67 | 10.07 |
| Quarries | 0.93 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.93 |
| Total 1957 | 76.58 | 82.20 | 176.25 | 192.43 | 49.10 | 104.23 | |

Changes

| | | | |
|--|---|---|--------------------|
|  | More vegetation cover |  | Retreat of gullies |
|  | Less vegetation cover |  | Filling of gullies |
|  | From agricultural use to natural vegetation | | |
|  | From natural vegetation to agricultural use | | |
|  | Other changes | | |
|  | No changes | | |

This matrix clearly shows the changes occurred in the gullied areas in the considered period. The changes were grouped in three sets:

- New eroded areas as result of the retreat of gullies. From these data the retreat rate was computed.
- Gullied areas that were filled.
- Land cover/use changes in the intersection of the 1957 and 1993 gullied areas. These changes are hereafter referred to as changes in the intersect gullied areas.

4.3.2.2.1. Retreat of gullies and retreat rate

The areas affected by the retreat of gullies in the period 1957-1993 are represented in the first column of the matrix of changes (Table 4.9). Spatially, this is represented in Figure 4.25.

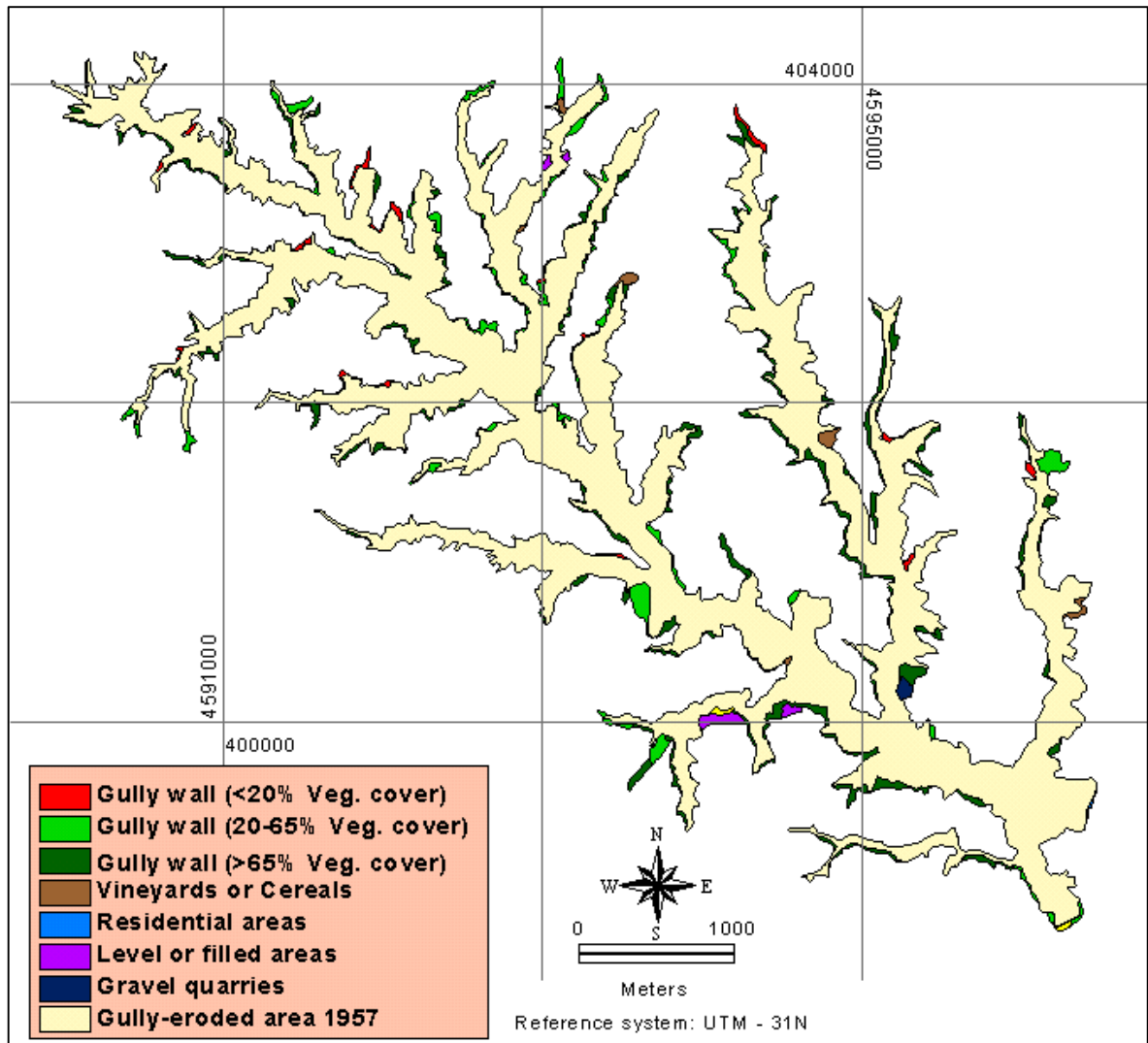


Figure 4.25. Areas of the Rierusa catchment affected by the retreat of gully walls during the period 1957-1993, and land cover/use class in the 1993 situation.

The total area affected by the retreat of gully walls, in the considered period of 36 years, was 76.57 ha. It supposes a rate of $2.12 \text{ ha year}^{-1}$ or, if referred to the area of the catchment, of $0.9 \text{ ‰ m}^2 \text{ year}^{-1}$. The linear retreat rate of gully walls supposes 0.2 m year^{-1} along the perimeter of the gullies of the Rierusa basin.

If the computed retreat rate was maintained, it last 840 years to the whole Rierusa catchment to be affected by gully erosion. This is only a very hypothetical prediction, since only the last 36 years were considered to compute the erosion rate. If the retreat rate is applied in a reverse way, the hypothetical start of the gully development in the study area could be estimated. Accordingly, it indicates gully erosion had started 320 years ago. This date is again very few probable, since the start of the incision of the Rierusa gully system is most sure contemporary to the incision of the Anoia river. However, it reflects the rate of gully erosion in the study area has not been always the same. In the recent past, the study area suffered one of the highest gully erosion rates of its history. It seems to be the consequence of a break in the equilibrium of the landscape system, that could have started

four centuries ago. What happened four centuries ago? Balcells (1980) reports that in the XVI starts in the Penedès region the massive plantation of vineyards under the protection of temporary contracts called *Rabassa Morta*. This supposed the clearing of forested shrublands and forested areas, that seems the most probable cause of the disequilibrium in the land system responsible for the higher runoff rates.

Particularly important seems to be the studied period (1957-1993), after the advent of the mechanisation. Other aspects different from the traditional soil and water conservation measures have been priority in this period (Porta *et al.* 1994, Poch *et al.* 1996).

Therefore, and although the measured rate of gully retreat is a measure of the past erosion and it could not have to be the same for the future, it is a measure of the very recent past erosion and, since the land use system has not changed towards implementing more soil and water conservation measures, similar gully erosion rates can be expected for the near future in the study area.

The rate of gully retreat measured in the Rierusa catchment was compared with the measured in the badlands of the Barasona reservoir basin, also in the NE Spain, (Penella 1997; Martínez-Casasnovas *et al.* 1997). In those badlands a rate of $2.8 \text{ \% m}^2 \text{ year}^{-1}$ was measured, using a similar approach and considering a period of 28 years. Different intrinsic conditions are given in the Barasona reservoir basin and, therefore, the gully erosion rates can not be directly compared. However, the Barasona basin is an area with much less human intervention. The man could have influenced the lower gully retreat rate in the Alt Penedès – Anoia. Farmers try to control the retreat of gullies by means of stacks of stones and the debris of the vines'cut-out along the boundary between gullies and parcels (Figure 4.26). Those are not very effective measures to control gully retreat (Poch *et al.* 1996, Usón 1998) but restrain it in some way.



Figure 4.26. Stack of stones in the boundary between a gully and a parcel in order to avoid the retreat of the gully sidewall.

The analysis of the spatial distribution of the retreat gully areas indicates that 60% of these areas were N or E oriented before they were eroded, meanwhile only 17% were S oriented (Table 4.10). The average slope was also higher than other locations in the catchment, 18.2% in front of 12.6% respectively. Most of the areas gullied during the period 1957 – 1993 (50.4% of inside areas in the 1957 situation within a buffer of 75 m from the 1957 gully perimeter), presented a vegetation cover of the type forested shrubland (20-65% vegetation cover) and mixed forest (>65% vegetation cover) (Table 4.10). The adjacent inside gully areas with a vegetation cover <20% supposed only 11.8% of the total buffer area.

Table 4.10. Summary of the topographic and vegetation cover characteristics of the gullied areas (period 1957-1993) and their adjacent gully-eroded areas (1957 situation).

| 1957 situation of the areas eroded during the period 1957-1993 | | | Land cover/use of the adjacent gully-eroded area (75 m buffer) | % of the total buffer area |
|---|-----------------------------|-------------------|--|----------------------------|
| Exposition | % of the total retreat area | Average slope (%) | Gully bed | 6.4 |
| North | 30.2 | 17.4 | Sidewalls <20% veg. cover | 28.0 |
| East | 29.9 | 18.0 | Sidewalls 20-65% veg. cover | 38.6 |
| South | 17.4 | 17.3 | Sidewalls >65% veg. cover | 11.8 |
| West | 22.5 | 20.0 | Crops | 15.2 |
| Average slope of the non-gully-eroded catchment area (1957 situation): 12.6 % | | | | |

In front of the results and conclusion of other authors (Morgan 1973, Imeson and Kwaad 1980, Crouch and Blong 1989), regarding stability of gully sidewalls, the most active retreat areas were the areas that presented better vegetation cover and are N or E oriented. The main retreat processes could be slips, produced by the incoherence of calcilutites and the higher humid conditions produced in those sidewall locations. This was observed during the field observations regarding the main processes related to the retreat of gully walls in the study area.

4.3.2.2.2. Filling of gullies

The pressure on agricultural land since the seventies to build-up recreational-urban and industrial areas has faced with the recognition and distinction of the quality of the wines and “cavas” produced in the Alt Penedès – Anoia. The last has revalued the main agricultural use of the land: vineyards, that now find less terrain for new plantations. The only way of expansion is to use marginal areas as inside gully areas after their filling and levelling (Figure 4.27 and Figure 4.28). In the Rierusa catchment, and for the considered study period, 38.79 ha of gullied areas were filled (Table 4.9). It represents the 6.4% of the gully-eroded area. The big investments that imply such a fillings and levellings sometimes have only a short life. The first high intensity rainfalls may produce the collapse of the filled areas.

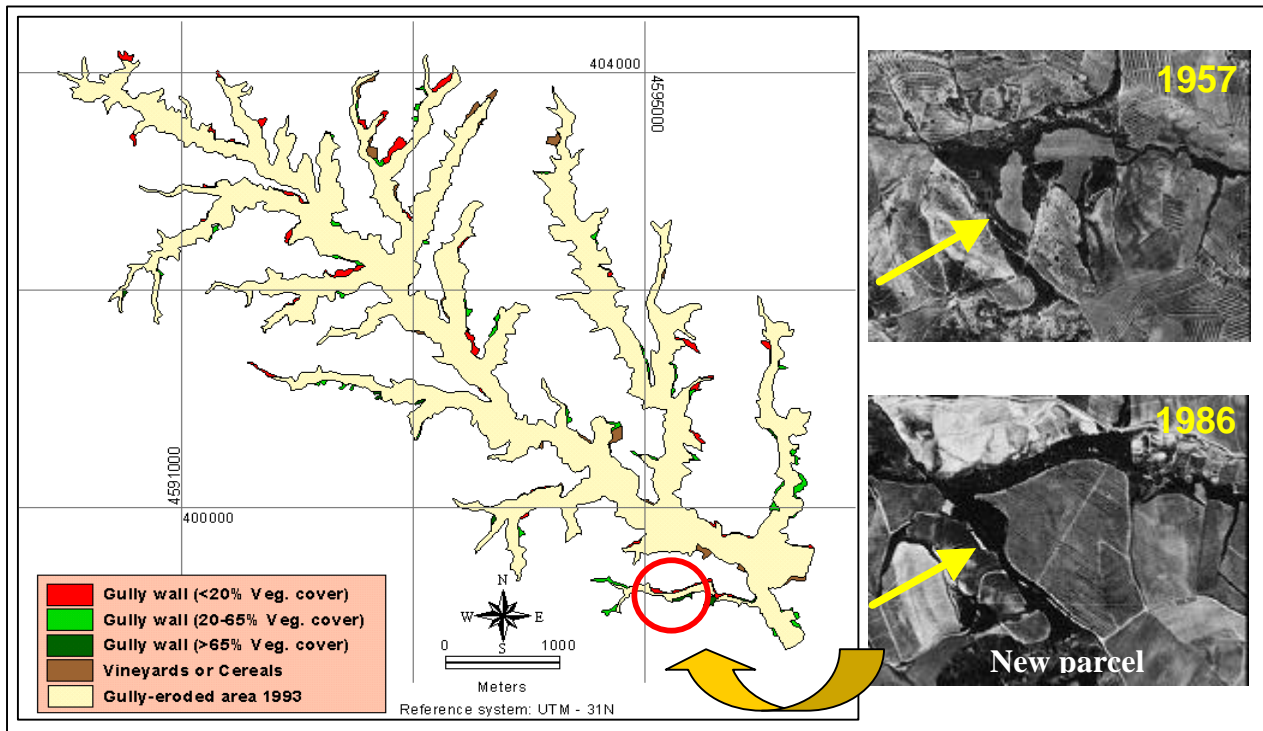


Figure 4.27. Gully-eroded areas in the Rierusa catchment that were filled during the period 1957-1993 and example of a new parcel after filling some gully-eroded areas.



Figure 4.28. Left: New vineyard parcel after the levelling of an old parcel and the filling of part of a gully (left) in the Rierusa catchment. Right: Filled gully.

4.3.2.2.3. Land cover/use changes in the intersect gully areas

The mapped changes in the intersect gullied areas in the Rierusa catchment are represented in (Figure 4.29) and in the matrix of changes (Table 4.9). The total intersect gullied area was 565.4 ha.

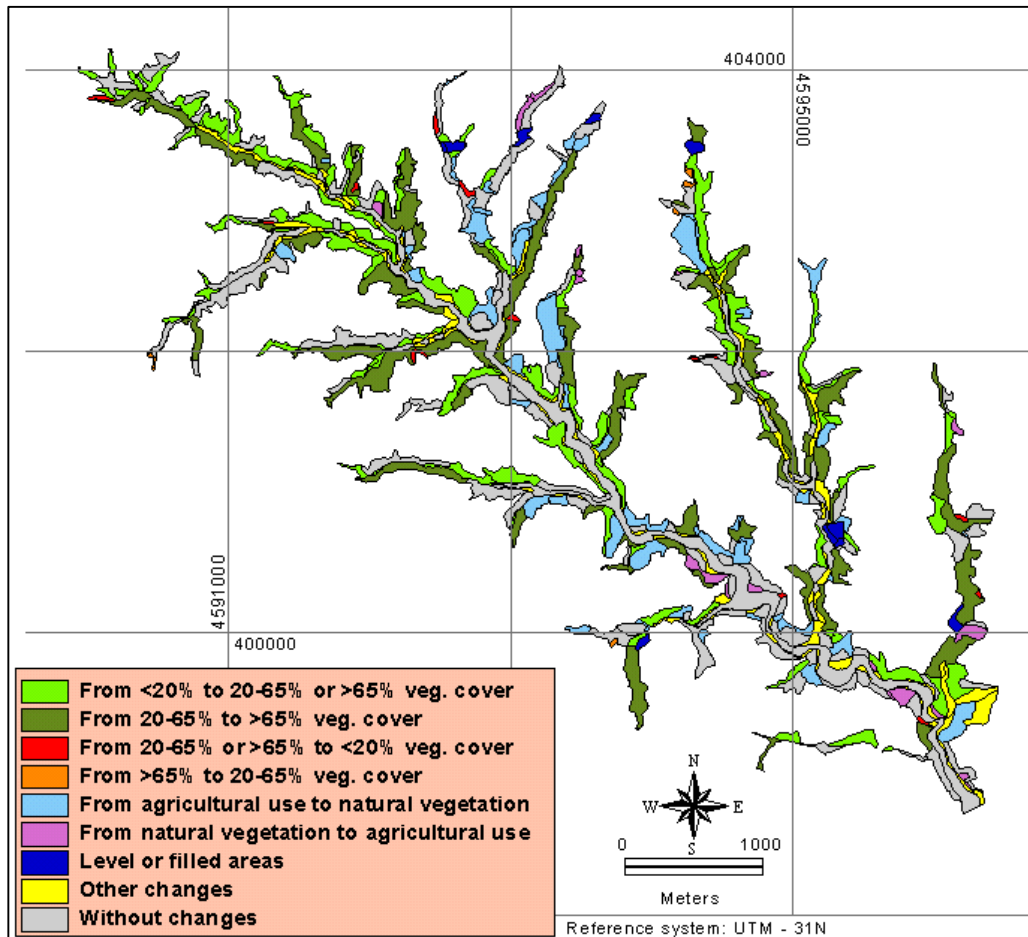


Figure 4.29. Changes in the intersect gullied areas in the Rierusa catchment. Period 1957 – 1993.

The major part of the area (54.6%, including changes from agricultural use to natural vegetation) experimented a vegetation cover increment. Several are the reasons explaining these important changes.

In the fifties the economy of the area was centred on the agricultural exploitation of the land. Even high slope degree areas inside gullies had been terraced and vines had been planted. Vegetation on gully walls was also used for grazing. It is the reason gully walls present a poorer vegetation cover in the image of the fifties.

After the advent of the mechanisation, at the end of the fifties and during the sixties, high slope degree areas inside gullies stop being cultivated because their exploitation is no longer economic. In a parallel way, the neighbour area of Barcelona experiments an important industrial prosperity, that influenced the socio-economic life of the area.

Agriculture went on being the main activity but not the only one and not under the same perspective. The increase of the purchasing power of the population influenced the demand of higher-quality products, that made a more specialised and technical agriculture. It involved marginal areas stopped being profitable for agriculture and were abandoned., Extensive grazing was also reduced, decreasing the pressure on vegetation growing on gully walls. Poorly covered gully walls progressively changed to more dense forested shrubs and mixed forested areas (*Pinus halepensis*, *Pinus pinea* and *Quercus ilex*), that conform the present situation.

Does it mean gullies are more stable at present than in the past because the only fact vegetation on gully walls has increased ? In my opinion, and on the basis of the knowledge acquired during the field work, the vegetation cover on the gully walls of the study area contribute to reduce the soil losses produced by processes such as splash and sheet erosion. It neither stops mass movements, slips or bank erosion, which are the main responsible processes for the lateral retreat of gullies, nor the concentration of runoff in specific points at the border of parcels, which is the main responsible for the linear retreat of gullies.

Other changes that occurred were the progressive building-up of recreational-urban areas (weekend or summer residences), in the inside gully areas. In total, 5.07 ha (0.9% of the intersect gullied areas) of this land use type was mapped in the 1993 situation. This is also related to the purchasing power increase of the people living in the surrounding big cities and their need of looking for natural areas for recreation.

Another change (above discussed) observed in the study area was the levelling of some gullied areas for agricultural use. It supposed 7.07 ha (1.25% of the intersect gullied area) in the studied period.

A less significant mapped change was the transformation of some natural vegetated areas, mainly located in the bottom of the gullies, into vineyard or small orchard parcels (10.7 ha, or 1.9% of the intersect gullied area).

An important part of the land cover/use of the gully walls of large gullies in the Rierusa catchment did not experiment changes (191.50 ha, or 33.8% of the intersect gullied area). These areas were mainly conformed by gully beds and forested walls (see main diagonal values in the matrix of changes).

4.3.2.3. Rate of material losses in the Rierusa catchment

4.3.2.3.1. Rate of material losses in the intersect gullied areas

The subtraction of the 1957 and 1993 digital elevation models in the intersect gullied areas, is shown in Figure 4.30. This figure clearly presents the most downcutting, mass movement and bank erosion active areas, as well as the areas that received materials as consequence of mass movements.

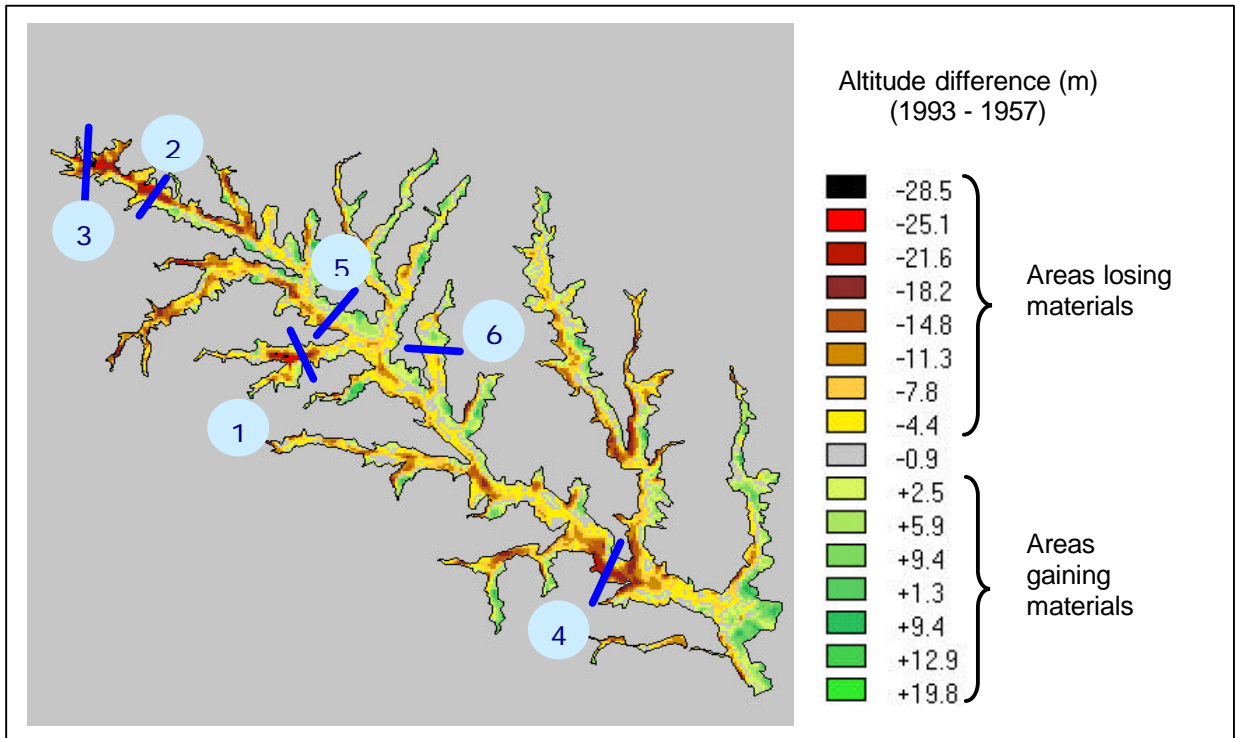


Figure 4.30. Result of the subtraction of the 1957 and 1993 digital elevation models in the intersect gullied areas of the Rierusa catchment and location of the cross-sections represented in Figure 4.31.

The most active downcutting processes are clearly located in the head of the Rierusa gully and the head of other neighbour branches. This is consequence of the high relative altitude (up to 200 m) of the heads with respect to the local base level in the outlet of the gully. The heads rapidly try to reach the local base level, producing a large deepening. In the studied period, the head of the Rierusa gully deepened approximately 25 m. This is shown in cross-sections 1, 2 and 3 in Figure 4.31. Other areas presented high erosion activity as consequence of downcutting and mass movements produced by the undercutting of the walls by stream flows (cross-section 4 in Figure 4.31). Other areas did not present significant changes (cross-sections 5 and 6 in Figure 4.31). These areas are usually located in the central and the proximal sections of the gully (near the main outlet), where the longitudinal profile is more stabilised.

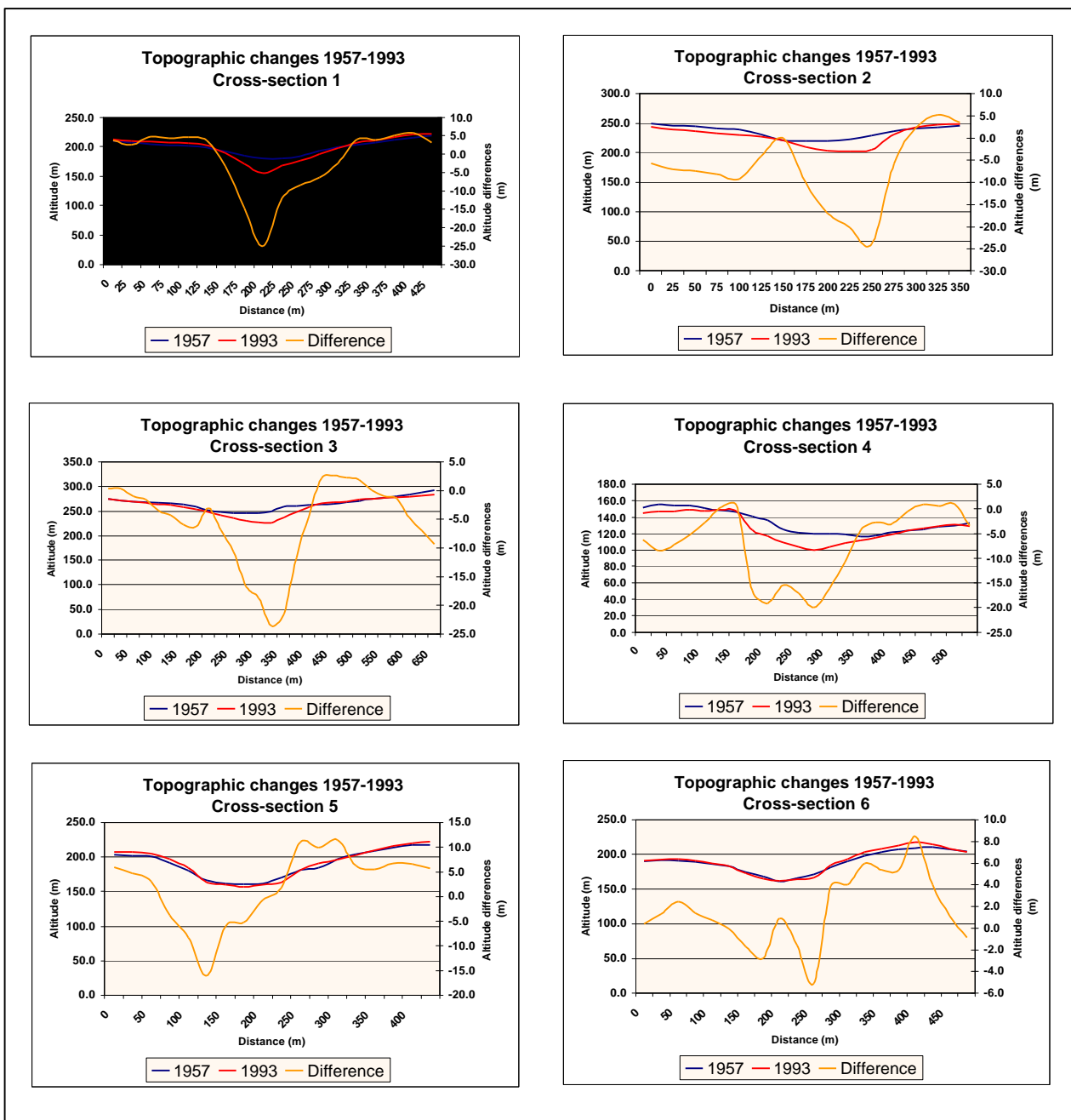


Figure 4.31. Cross-sections of the 1957 and 1993 digital elevation models and of the altitude differences of representative changes produced in the Rierusa catchment.

The altitude differences in the intersect gullied areas presented a negative balance. This indicates loss of materials has occurred during the studied period. From this balance, the volume of material losses can be computed. Only the altitude differences within the range $X \pm 3SD$ and $X \pm 0.5SD$ (where X is the mean value of the differences and SD is the standard deviation), were considered in order to minimize errors in the overlay of the DEMs (Figure 4.32).

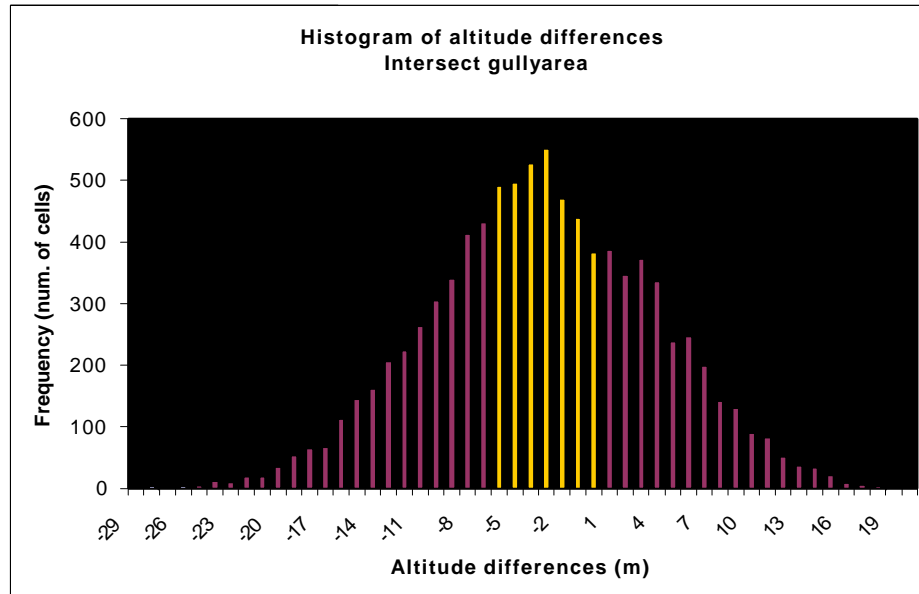


Figure 4.32. Histogram of the altitude differences in the intersect gullied areas and considered altitude differences.

The erosion rate was computed then by multiplying the sum of the altitude differences of each cell, the area of a grid cell and the average bulk density value of the eroded materials (1735 kg m^{-3} , see section 4.2.2). The so computed erosion rate in the intersect gullied areas was $992.6 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$.

4.3.2.3.2. Rate of material losses in the retreat gully areas

The same procedure was applied to compute the erosion rate in the gullied areas during the period 1957-1993 (Figure 4.33). In these areas, the loss of materials reach $366.5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$. This value is rather lower than the rate in the intersect gullied areas, since the mass movements and slips, responsible for the retreat of gully walls, usually produce short displacements of materials and lower altitude differences are computed.

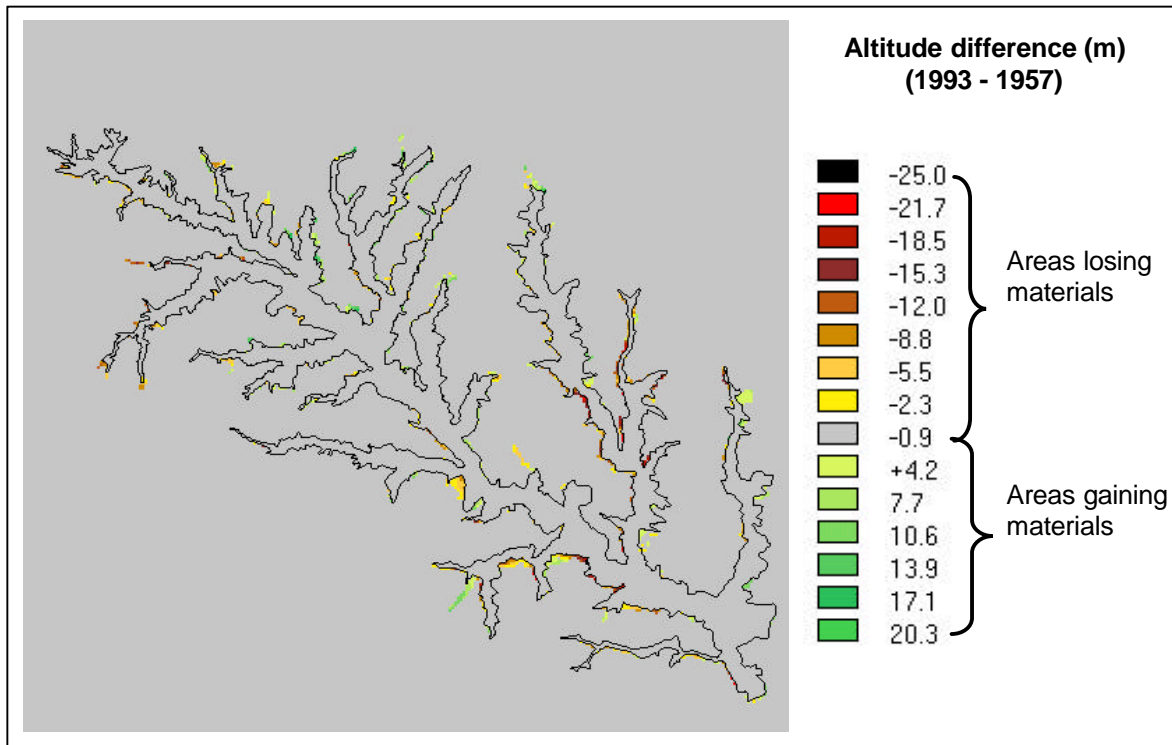


Figure 4.33. Result of the subtraction of the 1957 and 1993 digital elevation models in the areas affected by the retreat of gully walls in the Rierusa catchment.

4.3.2.3.3. Total rate of material losses in the Rierusa catchment

The total rate of material losses in the Rierusa catchment in the period 1957-1993 was computed as a weighted average of the losses in the intersect areas and the losses in the retreat areas. This rate was $917.9 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$, or $238.7 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ if referred to the total area of the Rierusa catchment.

In comparison with gully erosion rates measured by other researchers in different areas of the Mediterranean basin, as for example the $190 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ measured in badlands in the SE France (Bufalo and Nahon 1992), or the $302\text{-}455 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ measured in badlands in the Barasona reservoir basin in the NE Spain (Penella 1997, Martínez-Casasnovas *et al.* 1997), the estimated rate of $917.9 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ in the gullies of the Rierusa catchment is rather higher. The reason is erosion rates, as in the above mentioned cases, only include soil losses from overland flow. In the present case study, the resulting rate includes the losses produced by several erosion processes: overland flow (that produces sheet erosion), downcutting (that produces gully deepening and widening), headcutting (that produces extension of gullies into ungullied headwater areas), mass movements and bank erosion (that produces undercutting and falling of sidewalls).

The estimations of material losses could not be validated with sediment yield measurements since there were not gauging stations in the study area. Nevertheless, the implemented analysis technique, based on the comparison of digital elevation data, produced realistic results (Figure 4.31). This comparison only shows significant changes in the gully affected areas. The computed erosion rates are not directly comparable with rates from other areas since the last ones only account for overland flow erosion processes.

4.3.3. Risk of gully erosion

The existence of gullies in the study area is a clear reflection of the state of erosion. The computed growth rate in the recent past indicates the severity of the problem. Since the intrinsic and extrinsic conditions have not changed, it is expected gully erosion continues in the near future with similar erosion rates.

Two situations were considered with respect to gully erosion risk in the study area: a) the prediction of existing gully erosion at parcel level and b) development of existing gullies by headcutting and retreat of sidewalls.

4.3.3.1. Prediction of existing gully erosion at parcel level

The results of the application to the entire study area of the empiric-stochastical gully risk model (Meyer and Martínez-Casasnovas 1998) in two sample catchments of the Alt Penedès – Anoia is represented in Figure 4.34.

The probability map shows significant differences on the predicted of existing gully erosion in the different landscape units of the Alt Penedès – Anoia. These differences are the reflect of distinct relief characteristics.

The landscape unit with the highest probability of existence of gully erosion is the High dissected valley-glacis. It has a probability degree between 80-100 % in 80.9 % of the mapped unit (out of non-agricultural land) (Table 4.11). High probability degrees are also generalised in the northern area of the Piedmont-glacis unit and in the southern area. In this last case, high probability values appear in the slopes of the residual plane surfaces. Those areas are usually conformed by complex undulating to hilly slopes and by concave moderately steep and steep slopes.

Table 4.11. Observed frequencies of the probability classes of existing gully erosion at parcel level in the different landscape units.

| Landscape unit | Probability class | | | | |
|------------------------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| | 0 – 20 % | 20 – 40 % | 40 – 60 % | 60 – 80 % | 80 – 100 % |
| Piedmont-glacis North | 10.9 | 8.5 | 7.2 | 6.0 | 67.4 |
| Piedmont-glacis South | 6.1 | 6.4 | 6.8 | 5.0 | 75.7 |
| High dissected valley-glacis | 6.4 | 4.9 | 4.4 | 3.4 | 80.9 |
| Low dissected valley-glacis | 28.4 | 21.1 | 10.3 | 4.7 | 35.5 |
| Valley | 22.6 | 18.3 | 10.0 | 5.2 | 43.9 |

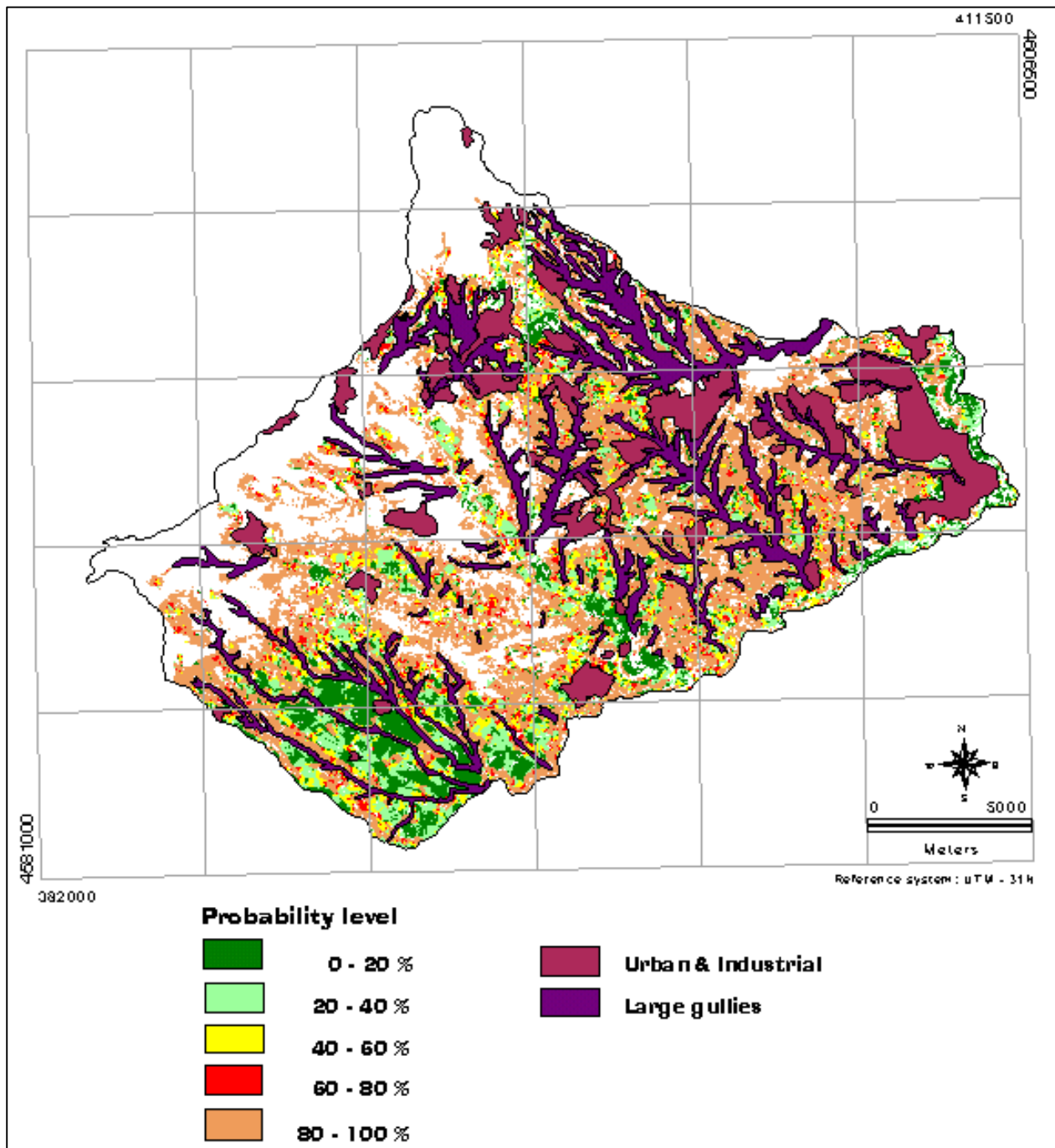


Figure 4.34. Probability of existing gully erosion at parcel level. (Based on the existing gully erosion prediction model of Meyer and Martínez-Casasnovas 1998).

The landscape units with the lowest risk degrees are the Low dissected valley-glacis and the Valleys. Part of those units also show a high probability value. Particularly relevant is the southern area of the Low dissected valley-glacis unit, that is the north face of the water divide between the Foix and Romaní basins. This area is characterised by higher slope degrees than in the rest of the area, which are responsible for the higher probability of gully erosion. In the valleys of the Anoia and Riudevilles rivers high probability of gully erosion exist on the slopes that connect terrace levels.

The applied model reflects, under similar lithologic and cropping system characteristics, topography is the main responsible for gully initiation in the Alt Penedès – Anoia. The more complex the slopes and the higher the slope degrees the higher is the probability to find gullies in agricultural parcels. The application of this model can be useful to locate the areas where concentration of runoff with a sufficient power to produce gully erosion is produced. From this information preventive and control measures can be planned.

4.3.3.2. Risk of development of existing gullies

The risk of development of existing gullies by retreat of gully walls was assessed by means of an evolutive model. It integrates the knowledge acquired during the field work and the results of the data analysis: multi-temporal image analysis (factors associated with the retreat of gully walls), existing gully erosion modelling, and gully-prone materials and infrastructure barriers (section 4.2.3.2).

The integration of the above mentioned factors produced the friction surface of Figure 4.35. In this friction surface the values represent the facility/difficulty with which gullies can move towards ungullied headwater areas. For a given ungullied location, a low friction value indicates a higher possibility a neighbour gully reach that position than if the location presents a higher friction value. In other words, areas with low friction values are areas with prone conditions for the retreat of gullies.

The application of the Idrisi cost-distance function from the 1993 gullied areas to the friction surface, produced a grid with the predicted cost of movement of the bordering gullied areas towards ungullied headwater locations (Figure 4.36). This model tries to predict how gullies would growth in the near future from the observed recent past pattern. It is expected that gullies growth distinctly in areas with different terrain characteristics.

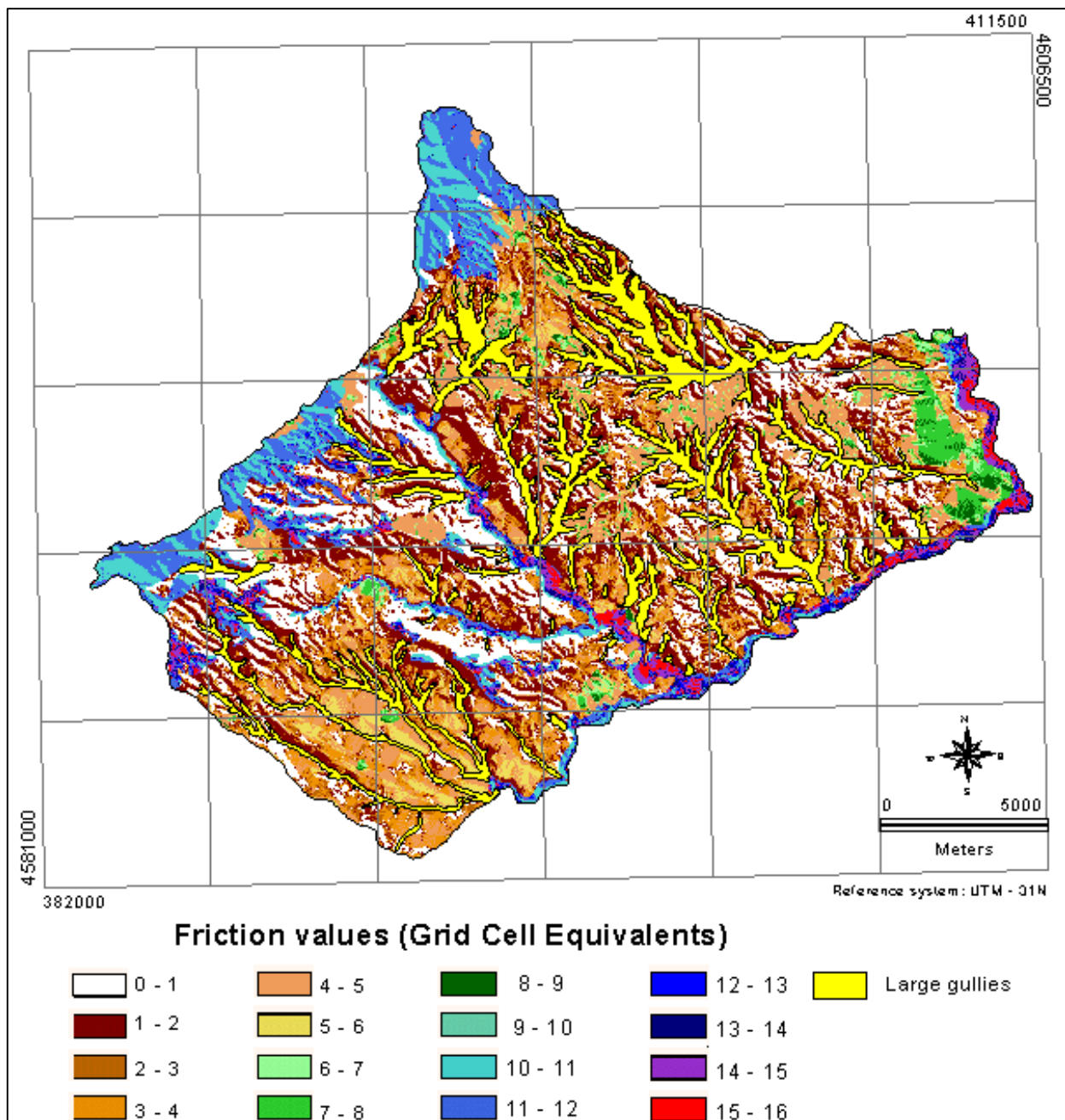


Figure 4.35. Friction surface that integrates the observed prone conditions and barriers for the retreat of gullies in the Alt Penedès – Anoià. The values indicate the facility/difficulty the terrain offers to the retreat of gully walls.

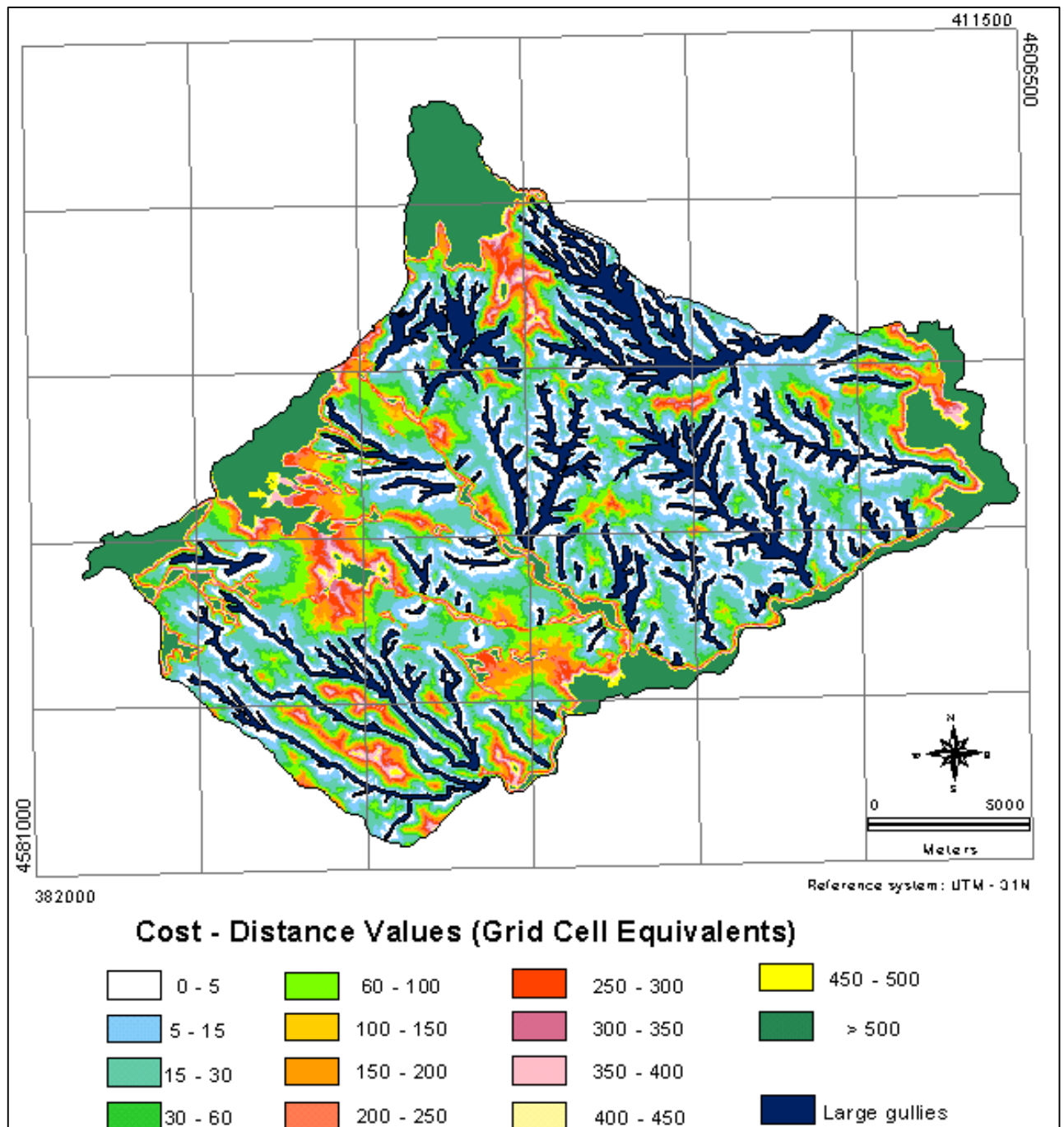


Figure 4.36. Cost-distance surface. The values represent the cost of movement of gully walls from gully bordering areas towards ungullied headwater areas according to the considered friction surface.

Wetter bordering parcel areas, north or east faced present lower cost values. It means more facility for gully walls to retreat towards those directions. Other factors slow down the advance of gullies. These are mainly hard rocks and, up to some extent, urban and industrial areas.

The validation of the evolutive growth model on the basis of reference data from the Rierusa basin yielded the following results (Figure 4.37).

Only 40% of the actual retreat areas were predicted by the model. Moreover, the error of commission (non eroded areas that are predicted as such) was very high (70%). The sensitive variation of the factorial weights of the model did not improve the results. This points to the resolution of the digital elevation model (25 m) as one of the main reason of the lack of fit of the model to the reference data. This is, the 25 m resolution DEM hardly was able to predict average retreats of 7.2 m, that were produced in the considered 36 year period. In this respect, 2-5 m resolution DEMs would be more appropriated to derive the topographic variables involved in the friction surface.

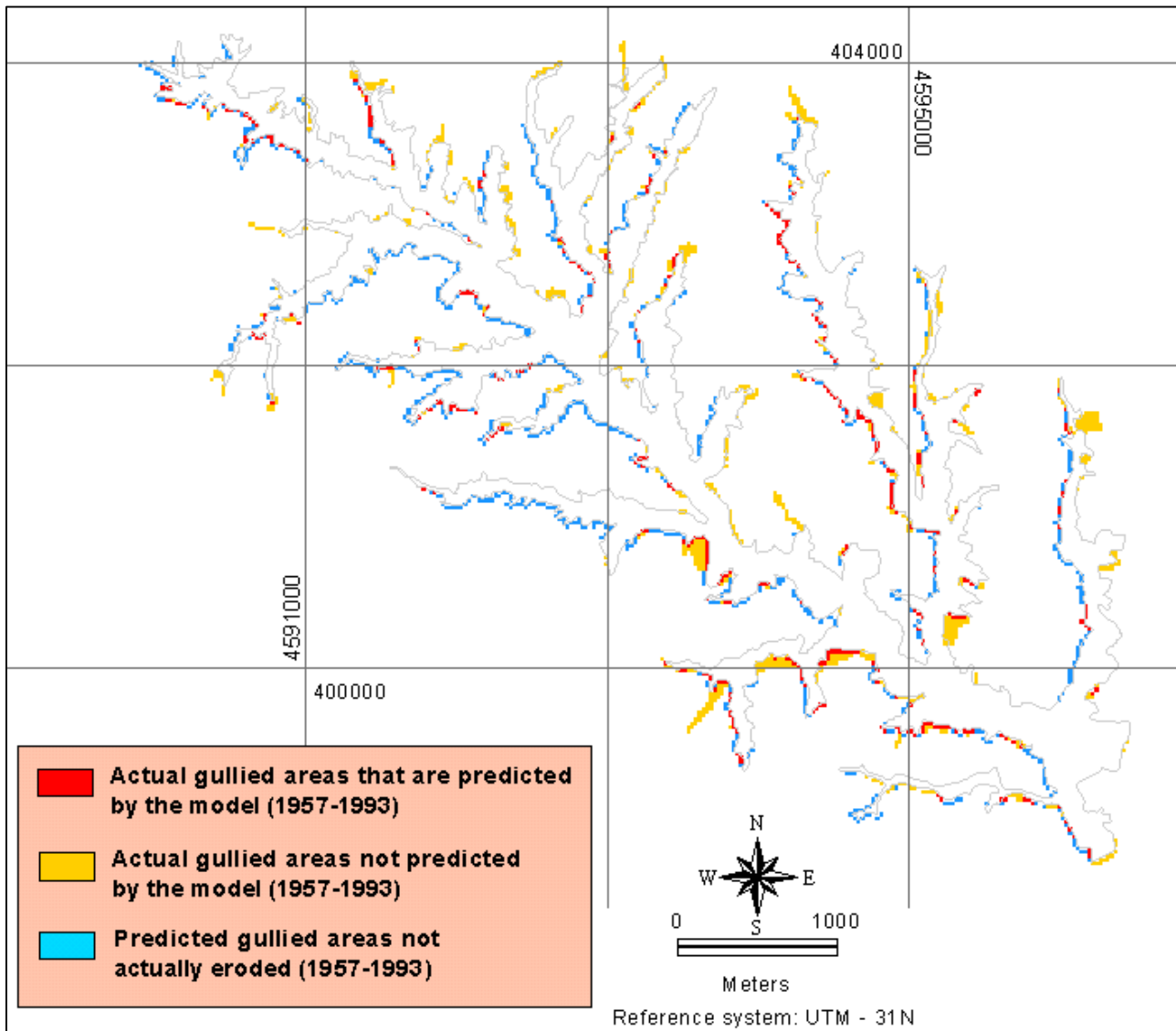


Figure 4.37. Cross-tabulation image of the measured retreat areas and the predicted gullied areas in the period 1957-1993 in the gullies of the Rierusa basin.

Although the defined evolutive gully retreat model did not produce satisfactory results because of the resolution of the data used for modelling, approaches based on cost-distance functions through friction surfaces point out as promising tools for evolutive gully retreat modelling. Friction surfaces must integrate the main terrain and land use factors associated

with the gully retreat in an area (prone conditions and barriers). The resolution of data for modelling must match the dimension of the studied phenomena.

Evolutionary models can be very useful in the location of most probable areas to be affected by the retreat of gullies in the near future. As an example, Figure 4.38 represents the predicted areas that will be eroded after a number of years equivalent to the studied period (36 years) from 1993 in the Alt Penedès – Anoia region.

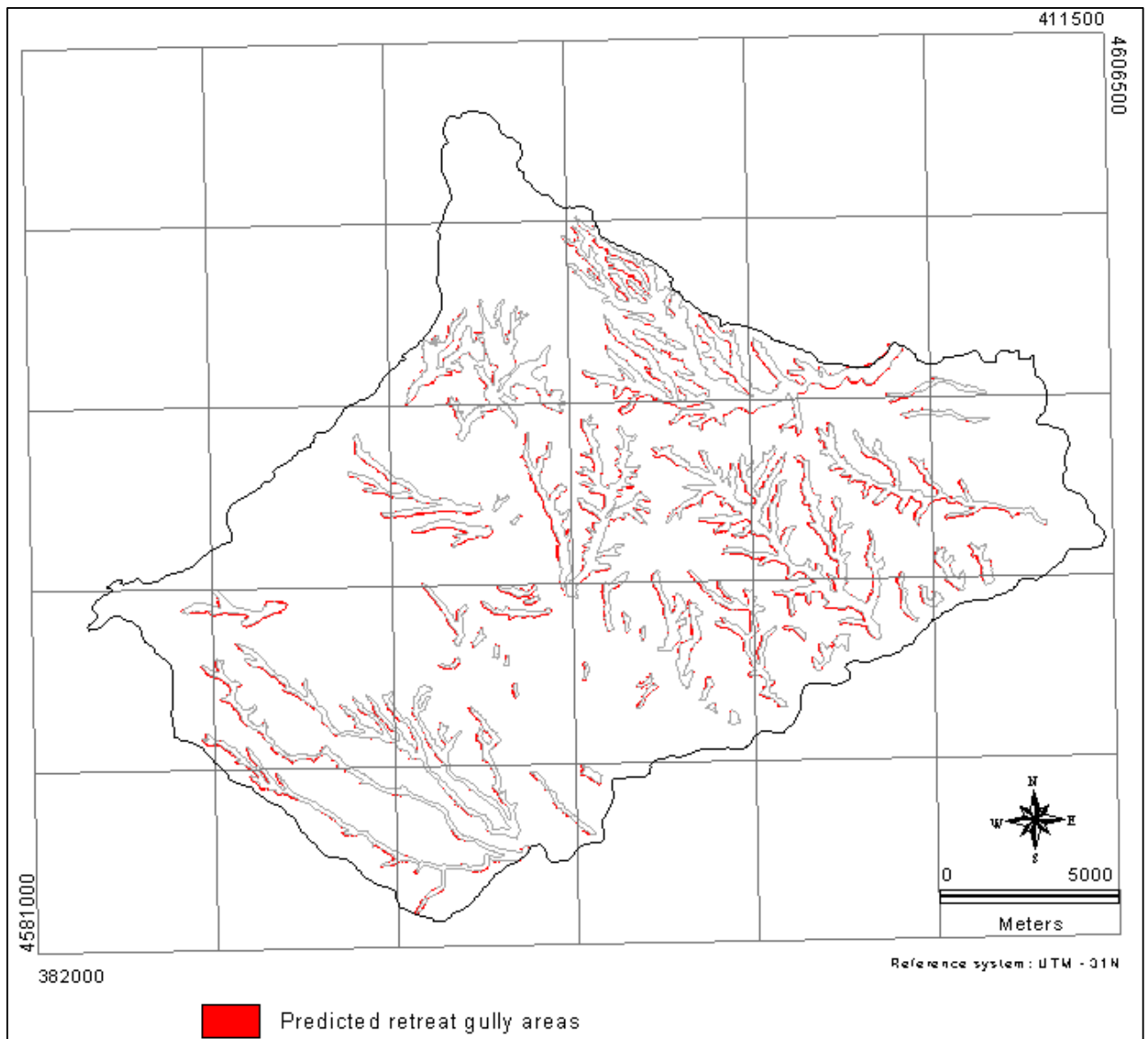


Figure 4.38. Hypothetical situation of the areas affected by the retreat of large gullies in the period 1993-2030 in the Alt Penedès – Anoia region, according to the proposed evolutive gully retreat model.

According to the above prediction, the gullies of the area to the north of the Anoia river would experiment higher retreat degrees than the gullies of the Low dissected valley-glacis unit. This confirms the higher potential for gully erosion in the former landscape units.

4.3.4. Preventive and control measures

In the Alt Penedès – Anoià, two are the main facts that determine the retreat of gully walls towards agricultural parcels and that new gullies develop in parcels. These are related to the manner runoff and infiltration water is managed. The retreat of gully walls is mainly caused by mass movements that are produced in the saturated zone of gully walls. This is caused by the infiltration and the accumulation of water in the lower parts of the parcels (Figure 4.39 A). The interception of the subsurface water flow, by means of a belt drainage system along the border between the parcel and the gully, could avoid the saturation of water in gully bordering areas (Figure 4.39 B). The distance of the drain from the gully border as well as its depth should be studied for each case. Particular attention should be paid to install the drains above the upper boundary of impermeable layers.

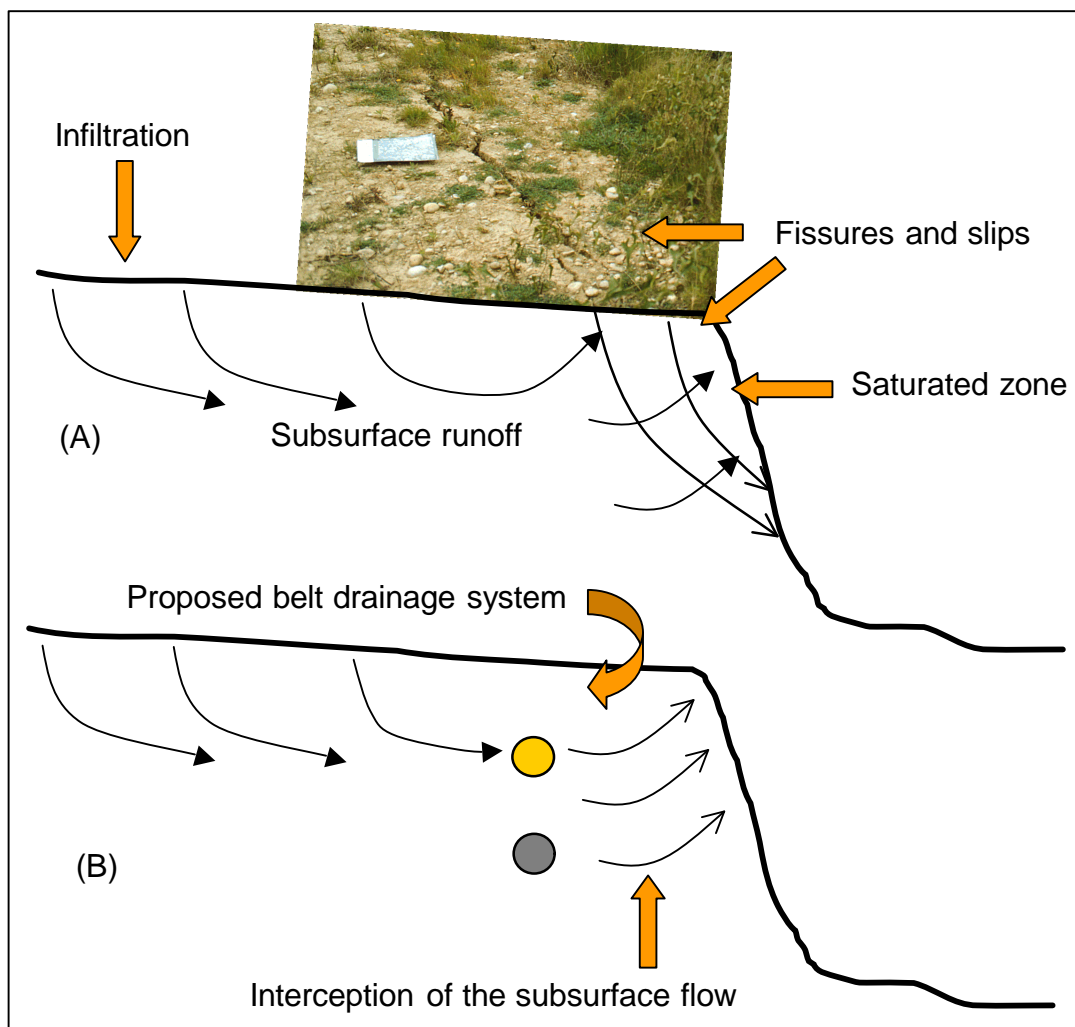


Figure 4.39. (A) Processes in the border between parcels and gullies, and (B) possible solution to avoid the saturation of those areas by subsurface runoff.

Another different process of gully wall retreat is caused by the concentration of water in drainage channels. The outlets of these channels are located in the border between the parcels and gullies (Figure 4.40 A). During high intensity rainfalls, the strength of the water flow in the outlet of drainage channels produces the erosion of the gully wall border and the development of new gullies towards headwater areas. These new gullies usually experiment a rapid growth thanks to the high relative relief with respect to the base level of the main gully. The free way out of water in the border of parcels may constitute truly waterfalls (Figure 4.17). This erodes the base, and the upper part of the wall finally falls by gravity (Figure 4.40A and B). A possible solution is the canalisation of runoff water from the present outlets to the gully water courses (Figure 4.40 C).

These measures should be complemented with other. These would have to be addressed to stabilise the gradient of the large gullies, as for example check dams.

The field work has shown that non of the above mentioned control measures are usually implemented in the study area. Farmers conduct runoff water to the border of their parcels and they fill ephemeral gullies that appear after high intensity rainfalls. When a gully wall falls and part of a parcel goes away, farmers fill the gully with soils or geologic materials, which are moved from other parts of the parcel. It involves big investments and it does not avoid gully erosion. At present, this is generally the erroneous idea that many farmers have about the sustainability of present land uses.

A change in the manner water is managed must be produced. First, it is very important to persuade farmers to implement those or other control measures, so the agricultural land uses are secured in decades to come.

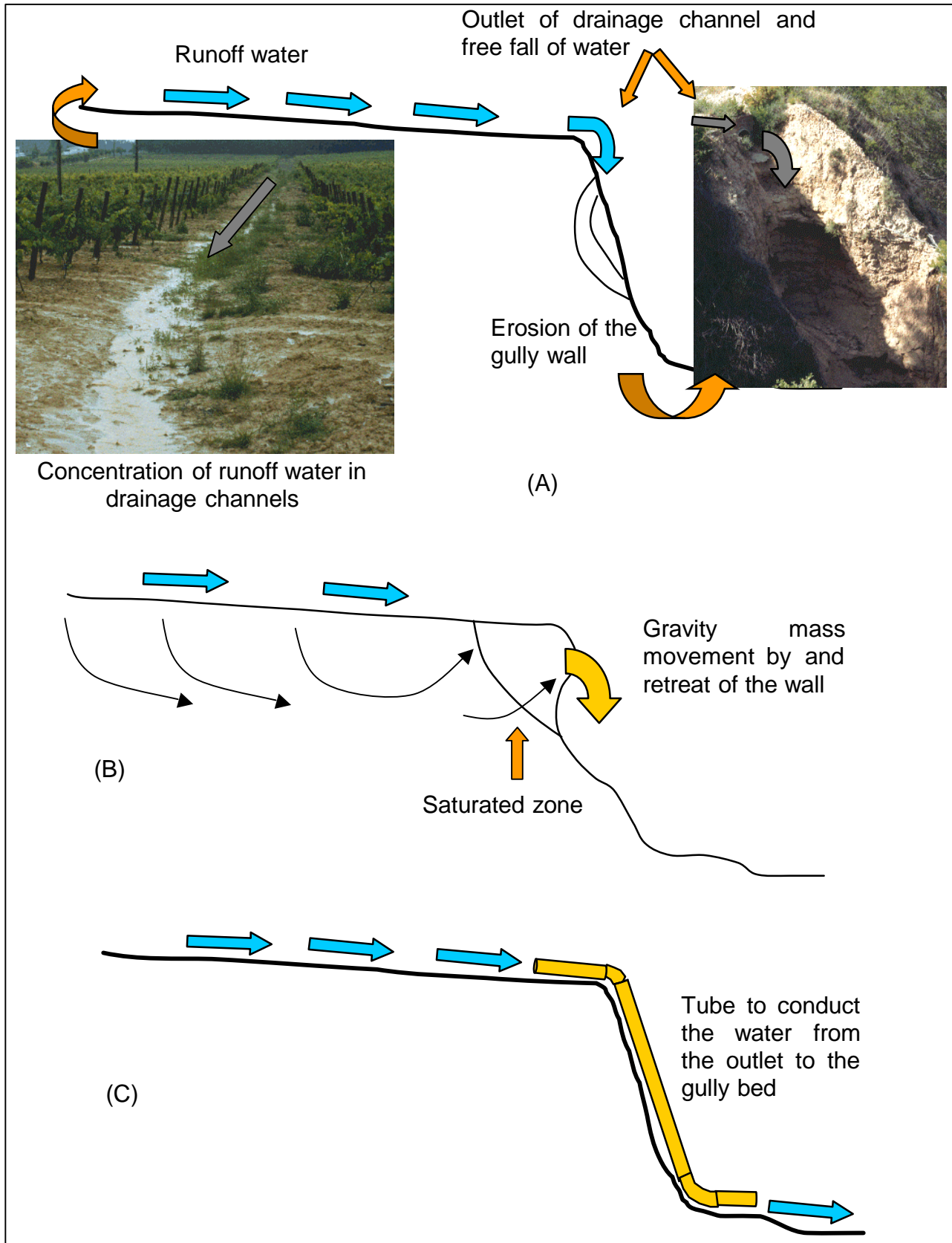


Figure 4.40. (A) Concentration of runoff water in drainage channels and free fall of water on the gully walls, (B) erosion of the gully walls and gravity mass movements, and (C) possible solution by means of the canalisation of runoff water from parcels to gully beds.

4.4. Conclusions

a. Methodology for gully erosion mapping and modelling

- Remote sensing and Geographical Information Systems (GIS) have been valuable techniques in the mapping of existing gully erosion, in the monitoring and calculation of gully erosion rates, and in the prediction of gully erosion.
- The interpretation of aerial photographs was the most useful tool for mapping gullied areas and for land cover/use mapping within the gullied areas. The Landsat image was useful to locate the main unvegetated gullied areas, such as badlands. The erosion processes occurring in vegetated gully walls had to be inferred from field observations.
- The proposed methodology to calculate the gully erosion rates at sub-catchment scale, based on the analysis of multi-temporal aerial photographs, multi-temporal Digital Elevation Models (DEMs) and GIS analysis, was as a valuable and easy to apply technique. This can be extended to other study areas.
- The evolutive gully growth model, based on the observed growth pattern and the use of cost-distance GIS functions, did not produce the expected results. It constitutes a very promising analysis tool. More research is needed to adjust the best fit friction surface representing the facilities/difficulties the terrain offers to the retreat of gully walls.

b. Gully erosion processes in the study area

- Gully erosion has been drastically accelerated since the late Middle Ages because of the massive deforestation and plantation of vineyards, and in the recent past since the advent of mechanisation. According to gully erosion indicators, the area can be considered as severely and very severely eroded.
- Gully growth is an active and dynamic process in the study area. The retreat of gully walls is mainly governed by mass movements, that are produced as result of the saturation of the unconsolidated calcilutites in the border areas between parcels and gullies. Precisely, the most vegetated gully walls usually coincide with the areas that present higher retreat rates, because of the prone wetter conditions of these areas for the two of them.
- Topography, because of its influence on the concentration of ruoff and the power of the water flow, is one of the main responsible factors for gully development in vineyard parcels. The more complex the slopes and the higher the slope degrees the higher is the risk.
- The application of the considered gully erosion risk models to the study area revealed the High dissected valley-glacis unit present the highest potential for both existence of small gullies at parcel level and development of existing large gullies. High potential gully erosion also generalised in the northern as wells as in the southern zones of the Piedmont-glacis unit.

4.5. References

- Balcells, A.**, 1980, *El problema agrario en Cataluña. La cuestión rabassaire (1890-1936)*. Serie de Estudios. Ministerio de Agricultura, Madrid.
- Bergsma, E.**, 1982, *Aerial photo-interpretation for soil erosion and conservation surveys. Part III: Erosion mapping*. ITC - Lecture notes SOL15. Enschede.
- Bergsma, E.**, 1987, Some central concepts in international soil conservation: A way of presentation. In: *Soil conservation and productivity*, Edited by I. Pla. Sociedad Venezolana de la Ciencia del Suelo, pp 28-45
- Bocco, G.**, 1990, *Gully erosion analysis using remote sensing and GIS*. PhD Thesis, University of Amsterdam, Amsterdam.
- Boixadera, J.**, 1983, *Proyecto de un área modelo de conservación de suelos en Piera-Masquefa*. PFC, ETSEA, UPC, Lleida.
- Brooks, N.K., Folliot, P.F., Gregersen, H.M. and Thomas, J.L.**, 1991, *Hydrology and the management of watersheds*. Iowa State University Press.
- Bufalo, M. and Nahon, D.**, 1992, Erosional processes of Mediterranean badlands: a new erosivity index for predicting sediment yield from gully erosion. *Geoderma*, 52: 133-147.
- Cerda, A.**, 1994, The response of abandoned terraces to simulated rain. In: *Conserving soil resources: European perspective*, Edited by R.J. Rickson, (Wallingford: CAB International), pp. 44-55.
- Chisci, G.**, 1994, Perspectives and soil protection measures in Europe. In: *Conserving soil resources: European perspective*, Edited by R.J. Rickson, (Wallingford: CAB International), pp. 339-353.
- Crouch, R.J. and Blong, R.J.**, 1989, Gully sidewall classification: methods and applications. *Zeitchr. F. Geomorphologie, N.F.*, 33: 291-305.
- Donker, N.H.W. and Damen, M.C. J.**, 1984, Gully system development and assessment of gully initiation risk in Miocene deposits near Daroca – Spain. *Zeitchr. F. Geomorphologie, N.F.*, Supplement-Bd 49: 37-50.
- Dymond, R.J. and Hicks, D.L.**, 1986, Steepland erosion measured from historical aerial photographs. *Journal of Soil and Water Conservation*, 41: 252-255.
- Garg, P.K. and Harrison, A.R.**, 1992, Land degradation and erosion risk analysis in S.E. Spain: A GIS approach. *Catena*, 19: 411-425.
- Gregory, K.J. and Gardiner, V.**, 1975, Drainage density and climate. *Zeitchr. F. Geomorphologie, N.F.*, 19: 287-298.
- Giordano, A. and Marchisio, C.**, 1991, Analysis and correlation of the existing soil erosion maps in the Mediterranean basin. *Quaderni di Scienza del Suolo*, 3: 97-132.

- Heede, H.**, 1970, Morphology of gullies in the Colorado Rocky mountains. *Bulletin International Association Society of Hydrology*, 15: 42-50.
- Heede, H.**, 1979, *Gully development and control*. USDA Forest Service Research Paper RM-169, Second edition. Fort Collins.
- Hernández, G.**, 1991, Métodos morfométricos en la identificación de áreas críticas en procesos erosivos. In: *Memoria del Taller de Erosion de Suelos*, 22-24 Julio 1991. Universidad Nacional de Heredia, Costa Rica.
- Hosmer, D.W. and Lemeshow, S.**, 1989, *Applied logistic regression*. Hohn Wiley and Sons, Inc. New York.
- Imeson, A.C. and Kwaad, F.J.P.M.**, 1980, Gully types and gully prediction. *K.N.A.G. Geografisch Tijdschrift*, XVI (1980), 5: 430-441.
- Ireland, H. A., Sharpe, C.F. and Eargle, D.H.**, 1939, *Principles of gully erosion in the Piedmont of South Carolina*. US Department of Agriculture Technological Bulletin 63.
- ISSS**, 1996, *Terminology for soil erosion and conservation*. ISSS-ITC-ISRIC. Wageningen.
- López, J. and Zinck, J.A.**, 1991, GIS assisted modelling of soil-induced mass movement hazard: A case study of the upper coello river basin, Tolima, Colombia. *ITC Journal*, 1991-4: 202-220.
- Martínez-Casasnovas, J.A. and Cervera, T.**, 1996, Gully erosion mapping by remote sensing techniques. A case study in the Anoia – Penedès region (NE Spain). *Primer Congreso Europeo sobre el Control de la Erosión, Abstract Book, Session 6: Measuring and modelling erosion processes*. Sitges (Barcelona), 29-31 May 1996.
- Martínez-Casasnovas, J.A., Poch, R.M., Fargas, D., Serrat, N., Penella, E. and Andreu, N.**, 1997, Estado de conservación de los suelos de la cuenca del embalse Joaquín Costa. *Actas del Encuentro Científico-Técnico sobre el vaciado total y prolongado del embalse de Joaquín Costa*, pp 1-12. Confederación Hidrográfica del Ebro, Zaragoza, 22-24 october 1997.
- Martínez-Casasnovas, J.A.**, 1998, A cartographic and a database approach for land cover/use mapping and generalisation from remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, (submitted March 1998, reviewed august 1998).
- Martínez-Casasnovas, J.A. and Stuiver, J.H.**, 1998, Automated delineation of drainage networks and elementary catchments from DEMs. *ITC Journal*, (in press).
- Meijerink, A.M.J.**, 1988, Data acquisition and data capture through terrain mapping units. *ITC Journal*, 1988-1: 23-44.
- Meyer, A. and Martínez-Casasnovas, J.A.**, 1998, Prediction of existing gully erosion in vineyard parcels of the NE Spain: A logistic modelling approach. *Soil Technology* (submitted August 1998).
- Moore, I.D., Burch, G.J. and Mackenzie, D.H.**, 1988, Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of ephemeral gullies. *Transactions of the ASAE*, 31: 1098-1107.
- Morgan, R.P.C.**, 1973, The influence of scale in climatic geomorphology: A case study of drainage density in West Malaysia. *Geografiska Annaler*, 55 A: 107-115.

- Morgan, R.P.C.**, 1979, *Soil erosion*. Longman G. Ltd. London.
- Mulders, M.A.**, 1987, *Remote sensing in soil science*. Developments in Soil Science num. 15. Elsevier, Amsterdam.
- Palacio, J.L. and López, J.**, 1994, Videography: an alternative remote sensing tool for monitoring gully erosion. *ITC Journal*, 1994-3: 233-237.
- Penella, E.**, 1997, *Caracterización de badlands y análisis de su dinámica mediante estudio multitemporal de fotografías aéreas y SIG en Campo (Huesca)*. PFC, ETSEA, Universitat de Lleida, Lleida.
- Poch, R.M., Martínez-Casasnovas, J.A., Usón, A. and Ramos, M.C.**, 1996, Conservació de sòls en vinyes de l'Anoia – Penedès: un enfoc cap a la sostenibilitat. *Actes de les Jornades sobre Agricultura i Medi Ambient*. Mollerusa, 16 March 1996.
- Porta, J., Ramos, M.C. and Boixadera, J.**, 1994, Mechanical measures for runoff management and erosion control in the vineyards of North East Spain. In: *Conserving soil resources: European perspective*, Edited by R.J. Rickson, (Wallingford: CAB International), pp. 369-378.
- Ramos, M.C. and Porta, J.**, 1993, Modelos de distribución espacio-temporal de las lluvias en la zona Mediterránea del Anoia-Penedés. Influencia en la sostenibilidad de los cultivos de la zona. *Ecología*, 7: 47-56.
- Ramos, M.C. and Porta, J.**, 1994, Rainfall intensity and erosive potenciality in the NE Spain Mediterranean area. *Il Nuovo Cimento*, 17C, 3: 291-299.
- Richter, G.**, 1980, Soil erosion mapping in Germany and in Czechoslovakia. In: *Assessment of erosion*, M. De Boodt and D. Gabriels (editors). Chichester, John Wiley and Sons, pp 29-52.
- Serrat, N. and Martínez-Casasnovas, J.A.**, 1998, Cartografía del riesgo de erosión hídrica en grandes cuencas hidrográficas mediante de teledetección y SIG. *Revista Montes* (aceptado).
- SCS**, 1966, *Procedure for determining rates of land depreciation and volume of sediment produced by gully erosion*. Technical Release num. 32 (Geology), Engineering Division of the USDA Soil Conservation Service.
- Seginer, I.**, 1966, Gully development and sediment yield. *Journal of Hydrology*, 4: 236-253.
- Solè, Ll., Clotet, N., Gallart, F. and Sala, I.**, 1986, Análisis de las posibilidades de las imágenes TM en la detección de áreas degradadas en sectores montañosos. In: *Coumunicaciones científicas de la I Reunión Científica del Grupo de Trabajo de Teledetección*, N. Clotet and Ll. Solè (editors). Institut d'Investigacions Geològiques Jaume Almera. Barcelona.
- Solé-Benet, A., Calvo, A., Cerdà, A., Lázaro, R., Pini, R. and Barbero, J.**, 1997, Influences of micro-relief patterns and plant cover on runoff related processes in badlands form Tabernas (SE Spain). *Catena*, 31: 23-38.
- SSS**, 1994. *Keys to Soil Taxonomy*. 6th Edition 1994. U.S. Department of Agriculture – Soil Conservation Service, Washington, D.C.
- Stocking, M.A.**, 1980, Examination of the factors controlling gully growth. In: *Assessment of erosion*, M. De Boodt and D. Gabriels (editors), John Wiley and Sons, Chichester, pp. 505-520.

- Stroosnijder, L. and Eppink L.A.A.J.**, 1993, *Principles of soil and water conservation*. Lecture notes of course K200-500/510. WAU. Wageningen, The Netherlands.
- Thomas, A.W., Welch, R. and Jordan, T.R.**, 1986, Quantifying concentrated-flow erosion on cropland with aerial photogrammetry. *Journal of Soil and Water Conservation*, 41: 249-252.
- Thompson, J.R.**, 1964, Quantitative effect of watershed variables on rate of gully head advancement. *Transactions of the ASAE*, 7: 54-55.
- Usón, A.**, 1998, *Medidas de control de erosion en suelos de viña de las comarcas Anoia – Alt Penedès (Barcelona): Efectividad y viabilidad*. PhD thesis. Universitat de Lleida, Lleida.
- Van Zuidam, R.A.**, 1985, *Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphological mapping*. Smith Publishers. The Hage.
- Vazquez, L. and Zinck, J.A.**, 1994, Modelling gully distribution on volcanic terrains in the Huasaca ara, central Mexico. *ITC Journal*, 1994-3: 238-251.
- Wischmeier, W.H. and Smith, D.D.**, 1978, *Predicting rainfall erosion losses - A guide to conservation planning*. USDA Agriculture Handbook num. 537. US Government Printing Office. Washington, DC.
- Williams, A.R. and Morgan, R.P.C.**, 1976, Geomorphological mapping applied to erosion evaluation. *Journal of Soil and Water Conservation*. 31: 164-168.
- Zinck, J.A.**, 1988, *Physiography and Soils*. Soil Survey Courses. Subject matter K6. ITC Lecture Notes SOL-41.
- Zinck, J.A.**, 1997, Riesgos ambientales y suelos. Enfoques para la modelización de la erosión por cárcavas y movimientos en masa. *Edafología*, special edition of the 50th anniversary of the Spanish Soil Science Society, pp 283-297.

5. Técnicas de teledetección, SIG y bases de datos espaciales para cartografía y modelización de suelos-paisaje-erosión.

(Remote sensing, GIS and spatial database techniques for soil-landscape-erosion mapping and modelling).

5.1. Obtención automática de relaciones espaciales en el análisis del territorio: Relaciones de adyacencia (vecindad) entre geoformas en el Alt Penedès – Anoia (Cataluña).

Martínez-Casasnovas, J.A. 1998. Obtención automática de relaciones espaciales en el análisis del territorio: Relaciones de adyacencia (vecindad) entre geoformas en el Alt Penedès – Anoia (Cataluña). *el 1er Congreso Nacional de Información Geográfica*. Sesión “La información geográfica en la gestión del territorial”, Valladolid, octubre de 1998.

Obtención automática de relaciones espaciales en el análisis del territorio: Relaciones de adyacencia entre unidades de paisaje en el Alt Penedès – Anoia (Cataluña).

Resumen

Una de las relaciones espaciales entre objetos más usadas en análisis del territorio es la adyacencia. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten registrar esta y otras relaciones como la conectividad y derivar otras a través de operaciones de análisis espacial como la proximidad, inclusión, intersección, etc. El registro de relaciones espaciales en modelos vectoriales se hace de una forma poco entendible por el usuario del sistema, que percibe las relaciones espaciales a nivel de objetos con existencia real o conceptual. La estructura de datos del mapa vectorial las considera a nivel de los elementos geométricos básicos o primitivos que definen las delineaciones de las unidades cartográficas del mapa. La obtención de índices de adyacencia entre unidades, como por ejemplo el porcentaje del perímetro que una unidad cartográfica X comparte con otra unidad Y, no suelen estar automatizadas por medio de funciones ejecutables en programas de SIG comerciales. Estos de índices son obtenidos a partir de la suma de las relaciones parciales entre delineaciones o polígonos que componen las unidades cartográficas, poniendo de manifiesto relaciones entre unidades a nivel global.

Un ejemplo de la aplicación de estos índices en análisis territorial es el de la adyacencia entre unidades geomorfológicas. En este sentido, el presente trabajo trata de la obtención y automatización de un índice de adyacencia para cuantificar la relación entre unidades geomorfológicas, que constituyen una información relevante para la descripción de las relaciones espaciales en el análisis del territorio. Como ejemplo se propone el índice de adyacencia entre unidades geomorfológicas y áreas de barrancos y badlands. Esta información podrá servir para la identificación de unidades de mayor riesgo de ser afectadas por la expansión de estas formas de erosión.

Se utiliza la estructura formal de datos (Formal Data Structure o FDS) propuesta por Molenaar (1993), como modelo de datos que permita la respuesta a consultas como la planteada del cálculo del índice de adyacencia entre unidades cartográficas de Paisaje y Relieve o cualquier mapa vectorial de áreas. La estructura formal de datos se ha implementado en el modelo físico de datos ArcInfo (ESRI). Como datos a los que aplicar el concepto y cálculo del índice de adyacencia se utiliza el mapa de unidades de Paisaje y Relieve del Alt Penedès-Anoia (Cataluña). La obtención del índice de adyacencia se ha automatizado mediante un programa, escrito en lenguaje macro y SQL (Structured Query Language) de Access (Microsoft), que manipula las tablas de atributos topológicos. Se ha elegido este entorno por su gran extensión a nivel de usuario y su fácil utilización. El programa combina en una macro las diferentes consultas estructuradas para el cálculo del índice de adyacencia.

5.1.1. Introducción

Una de las relaciones espaciales entre objetos más usadas en análisis del territorio es la adyacencia o también denominada vecindad. La justificación atiende a una de las principales leyes en geografía (Tobler 1970): todo está relacionado con todo pero los objetos o fenómenos más próximos entre sí están más relacionados que los más distantes.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten registrar esta y otras relaciones como la conectividad y derivar otras a través de operaciones de análisis espacial como la proximidad, inclusión, intersección, etc. A este respecto, el modelo vectorial topológico ofrece más posibilidades que el raster, ya que registra de forma explícita alguna de las relaciones elementales. En el modelo raster la única relación topológica posible es la vecindad de una celda con sus 4 u 8 vecinas, haciendo esto más complejo la obtención de relaciones entre objetos del terreno.

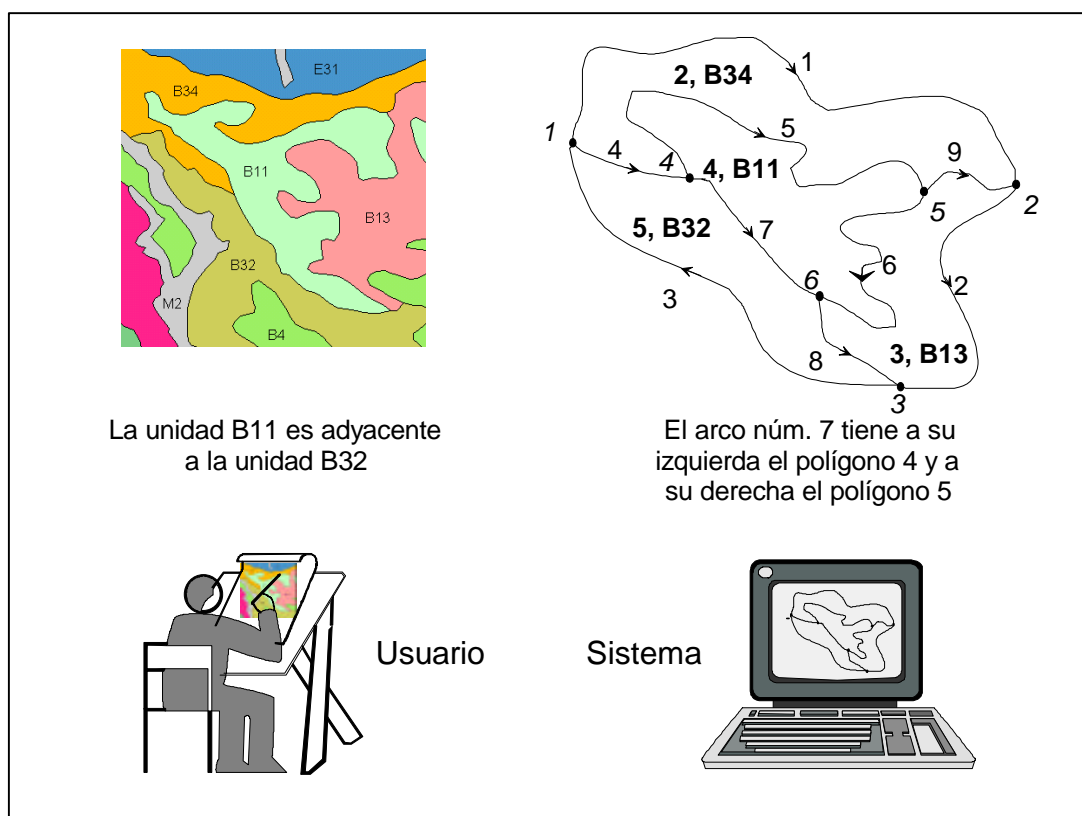


Figura 5.1.1. Percepción de relaciones espaciales entre objetos del terreno representados en un mapa y en un mapa vectorial en un Sistema de Información Geográfica.

A pesar de lo dicho sobre el registro explícito de relaciones espaciales en modelos vectoriales, este registro se hace a un nivel poco entendible por el usuario del sistema, que percibe las relaciones espaciales a nivel de objetos con existencia real o conceptual. Por su parte, la estructura de datos del mapa vectorial las considera a nivel de los elementos geométricos básicos o primitivos que definen las delineaciones de las unidades cartográficas del mapa (Figura 5.1.1).

Algunos de los programas de SIG existentes en el mercado, dentro del grupo de los denominados “desktop GIS” como por ejemplo Arcview o ArcInfo en el módulo Arcplot (ESRI), incorporan funciones que facilitan al usuario la búsqueda de polígonos adyacentes a uno o varios polígonos especificados. Estas herramientas son útiles en planificación territorial desde el punto de vista que permiten seleccionar áreas bajo la influencia o proximidad de zonas de actuación, identificar áreas de exclusión, etc. En estos casos el usuario no tiene por qué conocer la estructura de datos, pues el programa ejecuta una función programada, que la manipula en búsqueda de los polígonos adyacentes.

La obtención de índices de adyacencia entre unidades, como por ejemplo el porcentaje del perímetro que una unidad cartográfica X comparte con otra unidad Y, no suelen estar automatizadas por medio de funciones ejecutables en programas de SIG comerciales. Este tipo de índices se obtienen a partir de la suma de las relaciones parciales entre delineaciones o polígonos que componen las unidades cartográficas en cuestión, poniendo de manifiesto relaciones entre unidades a nivel global.

Un ejemplo de la aplicación de estos índices en análisis espacial es el propuesto por van Smaalen (1996). Este autor usa la relación global de adyacencia entre unidades para derivar objetos compuestos a partir de la agregación de objetos elementales que se presentan frecuentemente adyacentes en el espacio. De este modo, se pueden derivar representaciones de una realidad a diferentes escalas o niveles de agregación.

Otro ejemplo es el de la adyacencia entre unidades geomorfológicas (Zinck 1988, Zinck y Valenzuela 1990), que constituye una información relevante para la descripción de las relaciones espaciales entre unidades del territorio. El presente trabajo trata de la obtención y automatización de un índice de adyacencia para cuantificar la relación entre unidades de paisaje/relieve o geoformas. Como ejemplo se propone el índice de adyacencia entre unidades de paisaje/relieve y áreas de barrancos y badlands. Esta información podrá servir para la identificación de unidades de mayor riesgo de ser afectadas por la expansión de estas formas de erosión.

5.1.2. Materiales y métodos

5.1.2.1. Datos e índice de adyacencia

Como datos a los que aplicar el concepto y cálculo del índice de adyacencia se utiliza el mapa de geoformas (unidades de paisaje/relieve) del Alt Penedès-Anoia (Barcelona). Este mapa contiene delineaciones de las clases de geoformas o unidades cartográficas de paisaje/relieve que se describen en la Tabla 5.1.1.

Los atributos elementales asociados a cada delineación del mapa son: el número o código de la delineación, la unidad cartográfica (UC) o clase de geoforma a la que pertenecen, el área y el perímetro de la delineación. Otros atributos descriptores del relieve de las unidades cartográficas, como por ejemplo la pendiente media, densidad de drenaje, forma de las vertientes, etc., pueden ser también asociados a la entidad UC en la leyenda.

Tabla 5.1.1. Leyenda del mapa de unidades de paisaje/relieve (geoformas) del Alt Penedès-Anoia.

| Unidad de Paisaje | Geoformas | Código Mapa |
|---|--|-------------|
| Montaña (Sierra Prelitoral) | Vertientes escarpadas (pendiente >25 %) | A |
| Pie de monte | Plataformas residuales poco disectadas, elevadas 140-160 m sobre los cauces principales del área, (pendiente 5-15 %) | B11 |
| | Plataformas residuales moderadamente disectadas, elevadas 90-110 m sobre los cauces principales del área, (pendiente 5-15 %) | B12 |
| | Plataformas residuales disectadas, elevadas 140-160 m sobre los cauces principales del área (pendiente 5-15 %) | B13 |
| | Glacis (pendiente 5-15 %) | B2 |
| | Vertientes suave o moderadamente inclinadas (pendiente 1-10 %) | B31 |
| | Vertientes moderadamente inclinadas (pendiente 5-15 %) | B32 |
| | Vertientes complejas fuertemente inclinadas (pendiente 5-15 %) | B33 |
| | Vertientes moderadamente escarpadas o escarpadas (pendiente 20-30 %) | B34 |
| | Fondos (pendiente 5-15 %) | B4 |
| Vertientes y barrancos | Divisorias redondeadas (pendiente 5-15 %) | C1 |
| | Vertientes complejas fuertemente inclinadas (pendiente 5-15 %) | C21 |
| | Vertientes complejas fuertemente inclinadas o colinadas (pendiente 10-20 %) | C22 |
| | Vertientes complejas colinadas (pendiente 15-20 %) | C23 |
| | Vertientes moderadamente escarpadas a escarpadas (pendiente 20-30 %) | C24 |
| Relieve suavemente ondulado (Pla del Penedès) | Asociación de divisorias y vertientes moderadamente inclinadas (pendiente 5-10 %) | D1 |
| | Vertientes cóncavas suavemente inclinadas (pendiente 1-5 %) | D21 |
| | Vertientes en glacis y antiguas llanuras aluviales (pendiente 1-10 %) | D22 |
| | Vertientes cóncavas moderada o fuertemente inclinadas (pendiente 5-10 %) | D23 |
| | Vertientes moderadamente escarpadas (pendiente 10-20 %) | D24 |
| | Fondos (pendiente 5-10 %) | D3 |
| Niveles aluviales recientes | Llanuras aluviales (pendiente 1-10 %) | E1 |
| | Asociación de llanuras aluviales y terrazas (pendiente 5-10 %) | E2 |
| | Terrazas bajas (pendiente 5-15 %) | E31 |
| | Terrazas medias (pendiente 5-15 %) | E32 |
| | Asociación de terrazas y glacis coluviales (pendiente 5-15 %) | E33 |
| Áreas misceláneas | Áreas urbanas, industriales y de extracción | M1 |
| | Barrancos y badlands | M2 |

El índice de adyacencia (IA) entre dos objetos o, en este caso, entre dos unidades cartográficas X e Y se define como (van Smaalen 1996; Ecuación 5.1.1).

Ecuación 5.1.1 $IA_{(X,Y)} = P_{(X,Y)} / P_{(X)}$

Siendo: $IA_{(X,Y)}$ = Índice de adyacencia de la unidad X con la unidad Y
 $P_{(X,Y)}$ = Perímetro común total entre las unidades X e Y
 $P_{(X)}$ = Perímetro de la unidad X (suma del perímetro de todas las delineaciones)

El índice de adyacencia puede expresarse también como porcentaje respecto al perímetro de la unidad X, multiplicando IA por 100.

Para la evaluación del IA se propone *a priori* el criterio expuesto en la Tabla 5.1.2.

Tabla 5.1.2. Clases de adyacencia entre unidades cartográficas en función del índice de adyacencia.

| Clase de adyacencia de la unidad X con respecto a la unidad Y | IA = Porcentaje (%) de perímetro de la unidad X compartido con la unidad Y |
|---|--|
| Baja | < 10 |
| Media | 10 - 25 |
| Alta | 25 - 50 |
| Muy alta | > 50 |

5.1.2.2. Estructuras de datos

El modo de representación de las unidades cartográficas seleccionado es la estructura de datos vectorial topológica, por su mayor eficiencia y posibilidad en el registro de relaciones espaciales o topológicas como la adyacencia. En este modelo la estructura espacial de una realidad se hace en términos de objetos punto, líneas y áreas

El modelo topológico, también denominado arco-nodo, se basa en tres conceptos fundamentales (Martínez-Casasnovas 1994):

- **Conectividad:** Los arcos se conectan entre ellos en los nodos.
- **Adyacencia:** Los arcos tienen dirección, determinada por el nodo inicial y el nodo final, que define el espacio a la derecha y el espacio a la izquierda (Figura 5.1.2).
- **Definición de áreas:** Los arcos que se conectan rodeando un área definen un polígono.

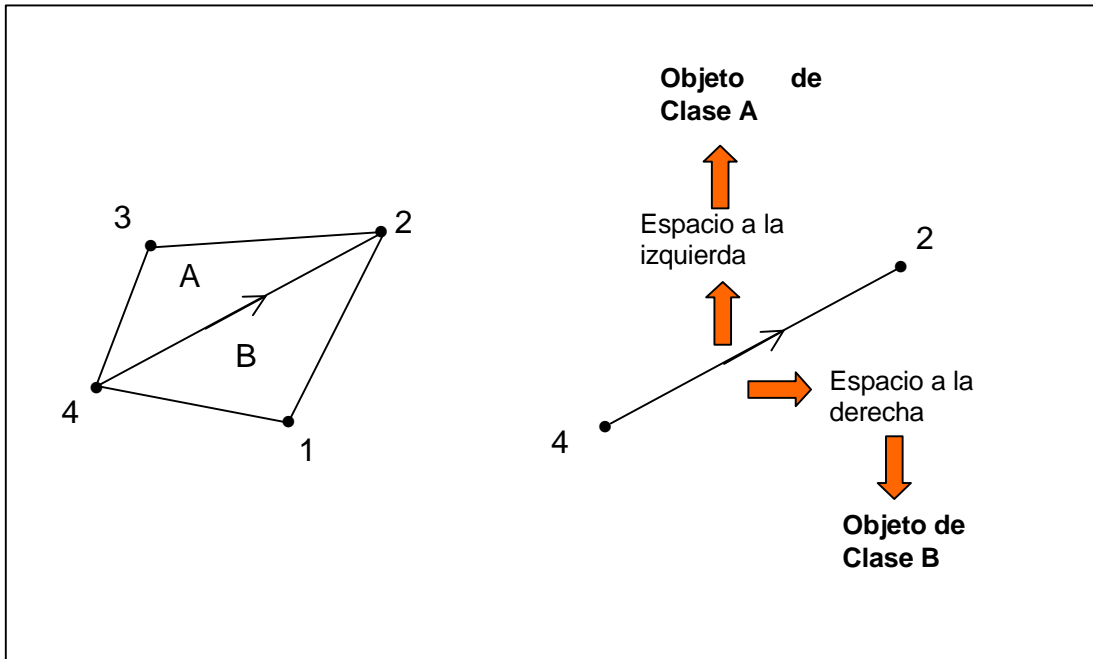


Figura 5.1.2. Relación de adyacencia entre áreas (representadas por polígonos). (Molenaar y Martínez-Casasnovas 1996).

Estos tres tipos de relaciones pueden registrarse en forma de tablas denominadas de topología (una para cada tipo de elemento geométrico básico o primitivo): tabla de topología de nodos, de arcos y de polígonos (Figura 5.1.3).

Para poder derivar de forma automática las relaciones espaciales, a nivel de objetos con existencia real, es necesaria una estructura de datos en la que las relaciones entre los objetos del terreno y los elementos geométricos o primitivos estén registradas (Martínez-Casasnovas 1994, Martínez-Casasnovas y Molenaar 1995). De esta forma, la respuesta a consultas como la planteada del cálculo del índice de adyacencia entre UCs de Paisaje/Relieve o cualquier mapa vectorial de áreas podrán ser fácilmente obtenidas.

Una estructura conceptual de datos que cumple estos requisitos es la Estructura Formal de Datos (Formal Data Structure o FDS) propuesta por Molenaar (1989 y 1993). Es una estructura vectorial topológica que registra las relaciones entre entidades a tres niveles: a) primitivos geométricos, b) primitivos geométricos y objetos del terreno y c) objetos del terreno (Figura 5.1.4). La descripción de este modelo de datos para mapas vectoriales y las relaciones entre los diferentes niveles topológicos ha sido formalizada por Molenaar y Martínez-Casasnovas (1996).

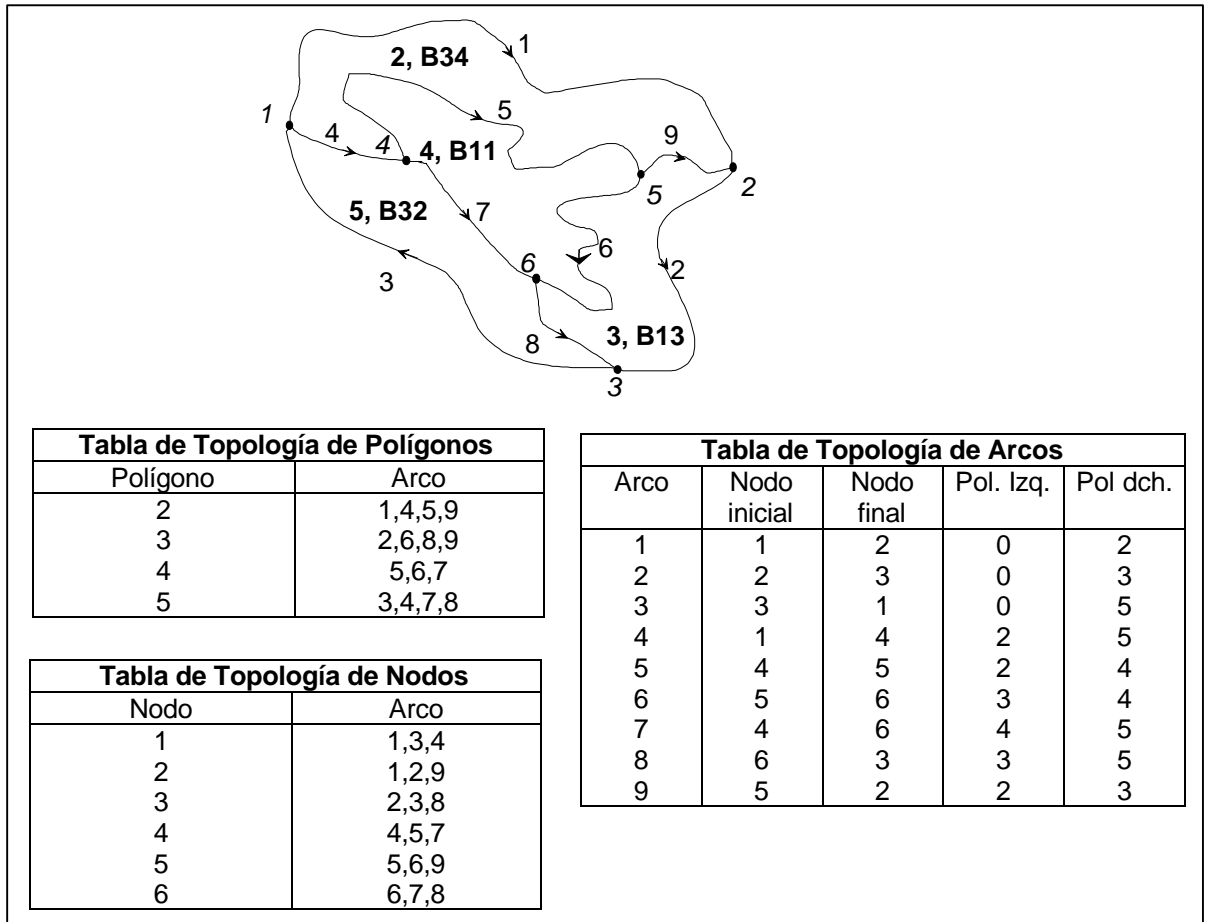


Figura 5.1.3. Representación gráfica vectorial y tablas de topología. Los polígonos representan delineaciones de unidades cartográficas (UC), con los que guardan una relación uno-a-muchos: por ejemplo, una UC puede tener una o más delineaciones en el mapa, mientras que una delineación solo pertenece a una UC.

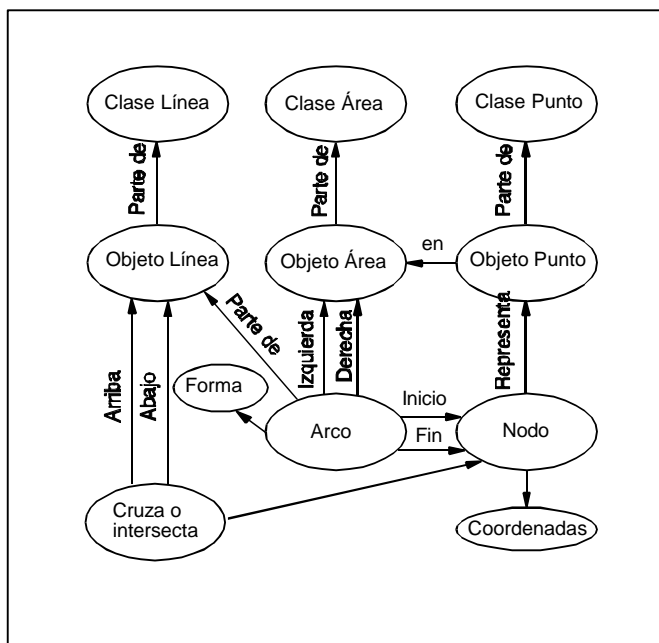


Figura 5.1.4. Estructura Formal de Datos (FDS) según Molenaar (1989). (Las flechas representan relaciones uno-a-muchos entre entidades: p.e. un objeto línea se compone de uno o más arcos).

La estructura formal de datos se ha implementado en el modelo físico de datos ArcInfo (ESRI), según el modo propuesto por van Smaalen y Molenaar (1993) (Figura 5.1.5).

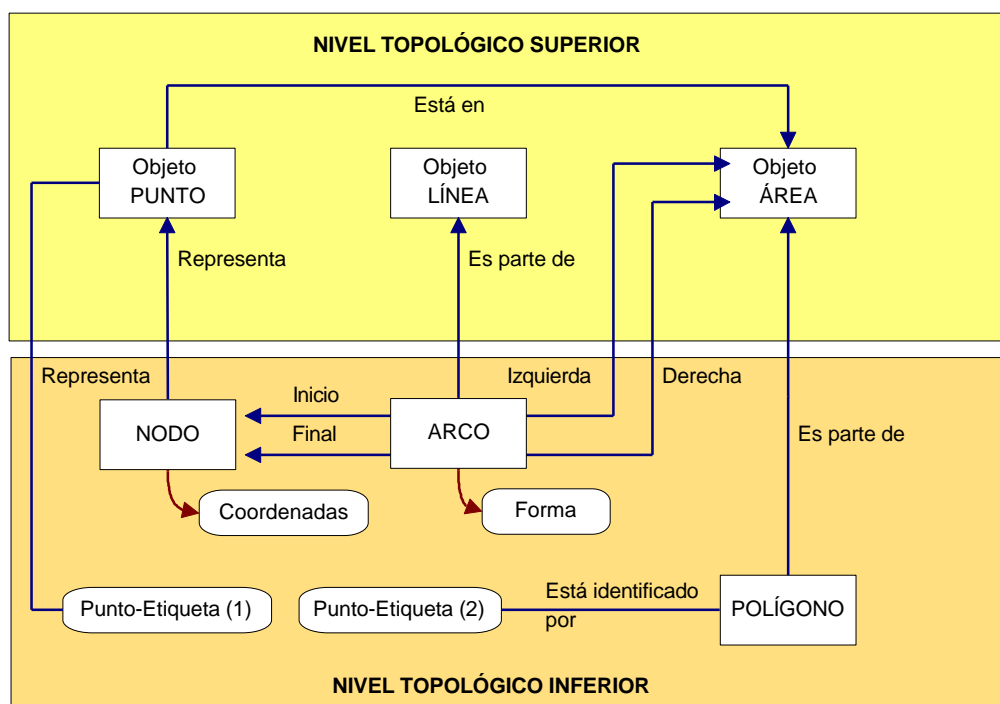


Figura 5.1.5. Estructura Formal de Datos (FDS) implementada en ArcInfo (van Smaalen y Molenaar 1993). (Las flechas representan relaciones uno-a-muchos).

El mapa de UC de Paisaje/Relieve se ha traducido a la estructura física del modelo ArcInfo, produciendo una cobertura o mapa vectorial que lleva asociadas dos tablas: a) tabla de atributos de polígonos (PAT, Tabla 5.1.3) y b) tabla de atributos de arcos (AAT, Tabla 5.1.4).

Tabla 5.1.3. Descripción de los campos de la tabla de atributos de polígonos (PAT) de la cobertura Paisaje/Relieve.

| Atributo | Descripción |
|------------|--|
| AREA | Superficie (m ²) de cada delineación o polígono del mapa de unidades cartográficas (UC). |
| PERIMETER | Perímetro (m) de cada delineación o polígono del mapa de UC. |
| GEOMORFO_ | Identificador interno de cada delineación o polígono del mapa de UC. Asignado automáticamente por el sistema. |
| GEOMORFO_I | Identificador del usuario de cada delineación o polígono del mapa de UC. Ha sido asignado automáticamente por el sistema de forma correlativa. |
| GEOMORFOL | Código de la UC a la que pertenece una delineación o polígono. (Ha sido añadido por el usuario a la tabla PAT creada por ArcInfo). |

(Nota.- A excepción del atributo GEOMORFOL, el resto son generados automáticamente por ArcInfo para cualquier cobertura con topología de polígonos).

Tabla 5.1.4. Descripción de los campos de la tabla de atributos de arcos (AAT) de la cobertura Paisaje/Relieve.

| Atributo | Descripción |
|------------|---|
| FNODE_ | Nodo inicial de un arco que define el límite de un polígono. |
| TNODE_ | Nodo final de un arco que define el límite de un polígono. |
| LPOLY_ | Identificador interno del polígono que se encuentra a la izquierda del arco. Se corresponde con el identificador GEOMORFO_ de la tabla PAT. |
| RPOLY_ | Identificador interno del polígono que se encuentra a la derecha del arco. Se corresponde con el identificador GEOMORFO_ de la tabla PAT. |
| GEOMORFO_ | Identificador interno del arco. Asignado automáticamente por el sistema. |
| GEOMORFO_I | Identificador del usuario del arco. Ha sido asignado automáticamente por el sistema de forma correlativa. |

(Nota.- todos los atributos de esta tabla son generados automáticamente por ArcInfo al crear topología de líneas a la cobertura vectorial).

5.1.2.3. Automatización del cálculo del índice de adyacencia

La obtención del índice de adyacencia se ha automatizado mediante un programa, escrito en lenguaje macro y SQL (Structured Query Language) de MS Access 7.0, que manipula las tablas de atributos PAT y AAT. Se ha elegido este entorno por su gran extensión a nivel de usuario y su fácil utilización. El programa combina en una macro las diferentes consultas estructuradas para el cálculo del índice de adyacencia.

5.1.3. Resultados y discusión

5.1.3.1. Estructura de datos

La aplicación de la estructura de datos FDS según el modelo ArcInfo al mapa vectorial de áreas (unidades de Paisaje/Relieve del Alt Penedès-Anoia), ha producido un modelo con tres niveles topológicos (Figura 5.1.6). Estos se corresponden con los diferentes niveles de percepción de las relaciones topológicas entre sistema (SIG) y usuario. El nivel topológico inferior registra las relaciones a nivel de primitivos y es directamente entendible por el sistema. El nivel topológico superior entiende las relaciones entre objetos con existencia real o conceptual, a nivel global de todos los miembros agrupados por clases (UCs). El puente entre ambos niveles lo constituye el denominado nivel intermedio, que registra las relaciones parciales de las delineaciones (miembros de una clase o UC) con los elementos geométricos que los definen en el mapa vectorial. Este nivel se corresponde con el de objetos área en la FDS de Molenaar (1989).

Este modelo de niveles topológicos supone una modificación del propuesto por van Smaalen y Molenaar (1993) al considerar un nivel superior donde se registran las relaciones entre entidades no espaciales sino conceptuales: las clases. Por otra parte, los polígonos son considerados parte de un nivel intermedio. Son individuos o miembros de las clases con existencia espacial, teniendo por tanto atributos geográficos: localización, área, perímetro, forma, etc. El nivel inferior está representado por los primitivos: nodos, arcos y puntos-etiqueta, que sirven para identificar los polígonos.

5.1.3.2. Programa para la obtención automática del índice de adyacencia

Del análisis de la estructura de datos del mapa vectorial de Paisaje/Relieve propuesta en la Figura 5.1.6, se deduce el procedimiento lógico para la obtención automática del índice de adyacencia (IA) mediante la manipulación de las tablas de atributos. Dicho procedimiento se muestra en la Figura 5.1.7. Se estructura en 4 fases (más una opcional si lo que se desea es solamente la adyacencia a una o varias UCs especificadas).

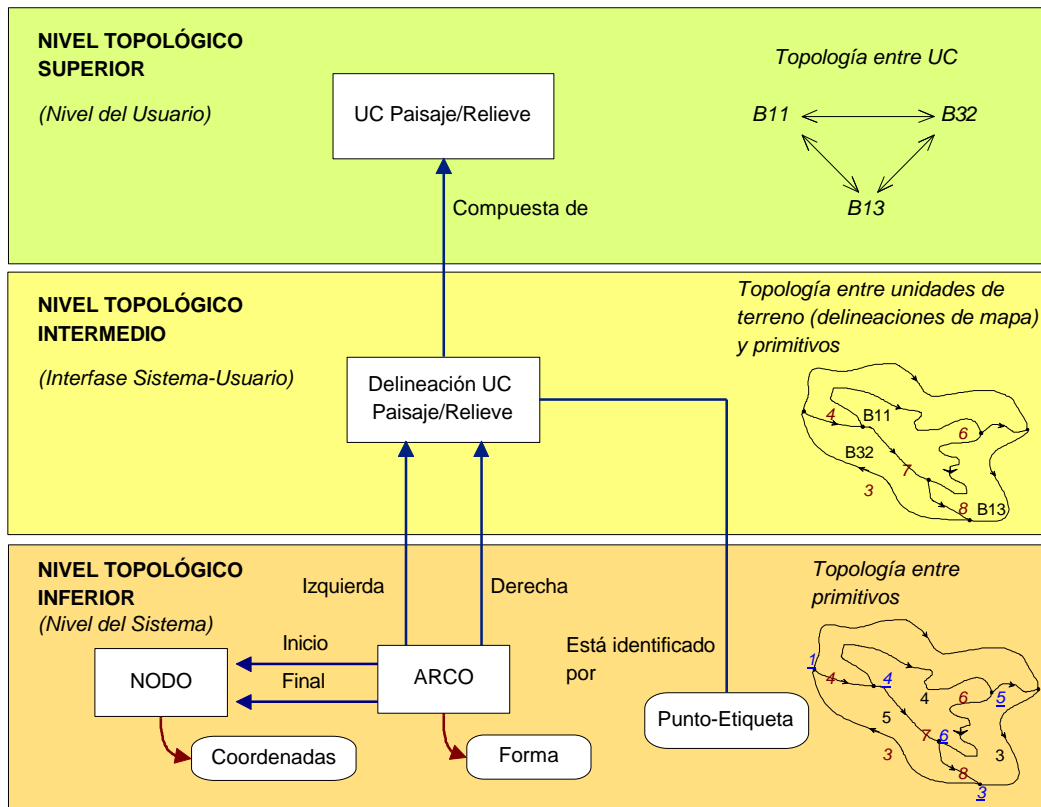


Figura 5.1.6. Niveles topológicos de la estructura de datos del mapa vectorial de unidades cartográficas utilizados para la obtención del índice de adyacencia. (En otras aplicaciones la entidad UC puede ser diferente a la de Paisaje/Relieve, p.e. unidades de vegetación, al igual que las delineaciones de las UCs).

La primera fase opera en los niveles topológicos inferior e intermedio, buscando los polígonos adyacentes y la UC a la que pertenecen a través de los arcos comunes que comparten. A nivel de consulta a las tablas de topología, esto se consigue mediante la relación de las tablas PAT y AAT por medio del identificador interno de los polígonos en la tabla PAT y sus homónimos RPOLY_ o LPOLY_ en la tabla AAT (Tabla 5.1.5).

El resultado son dos tablas, denominadas *arco* y *polígono a la derecha o izquierda* con los atributos: identificador del arco, longitud y clase de UC a la que pertenece el polígono a su derecha o izquierda.

Estas tablas son el punto de partida de la fase 2, con un doble objetivo: a) la búsqueda para cada delineación de una UC de los polígonos a su derecha o izquierda y b) la suma del perímetro o longitud de los arcos compartidos de los polígonos adyacentes pertenecientes a la misma UC.

La fase 3 opera en los niveles topológicos intermedio y superior de la Figura 5.1.6, ya que supone el cálculo del perímetro compartido entre combinaciones de UCs a partir de los parciales de cada delineación de la fase anterior y, por otra parte, el cálculo del perímetro total de las UCs a partir del de la suma de perímetros de cada delineación de una UC. A nivel de cálculo esta fase se ha resuelto mediante dos consultas SQL independientes, tal como se especifica en

El índice de adyacencia global entre UCs se obtiene finalmente mediante una relación entre perímetros compartidos y totales de la UC, que opera en el nivel topológico superior (fase 4). El resultado es una tabla con el IA de una unidad X con cada una de las otras UC consideradas en la leyenda del mapa vectorial.

De modo opcional, y a partir de la tabla final del IA, se puede seleccionar la adyacencia entre cualquier UC y la unidad Y, o bien entre la unidad X y la unidad Y. En la Tabla 5.1.5, y a modo de ejemplo utilizando el mapa de Paisaje/Relieve del Alt Penedès-Anoia, se muestra la consulta de selección del IA de las UCs del mapa a áreas de barrancos y badlands.

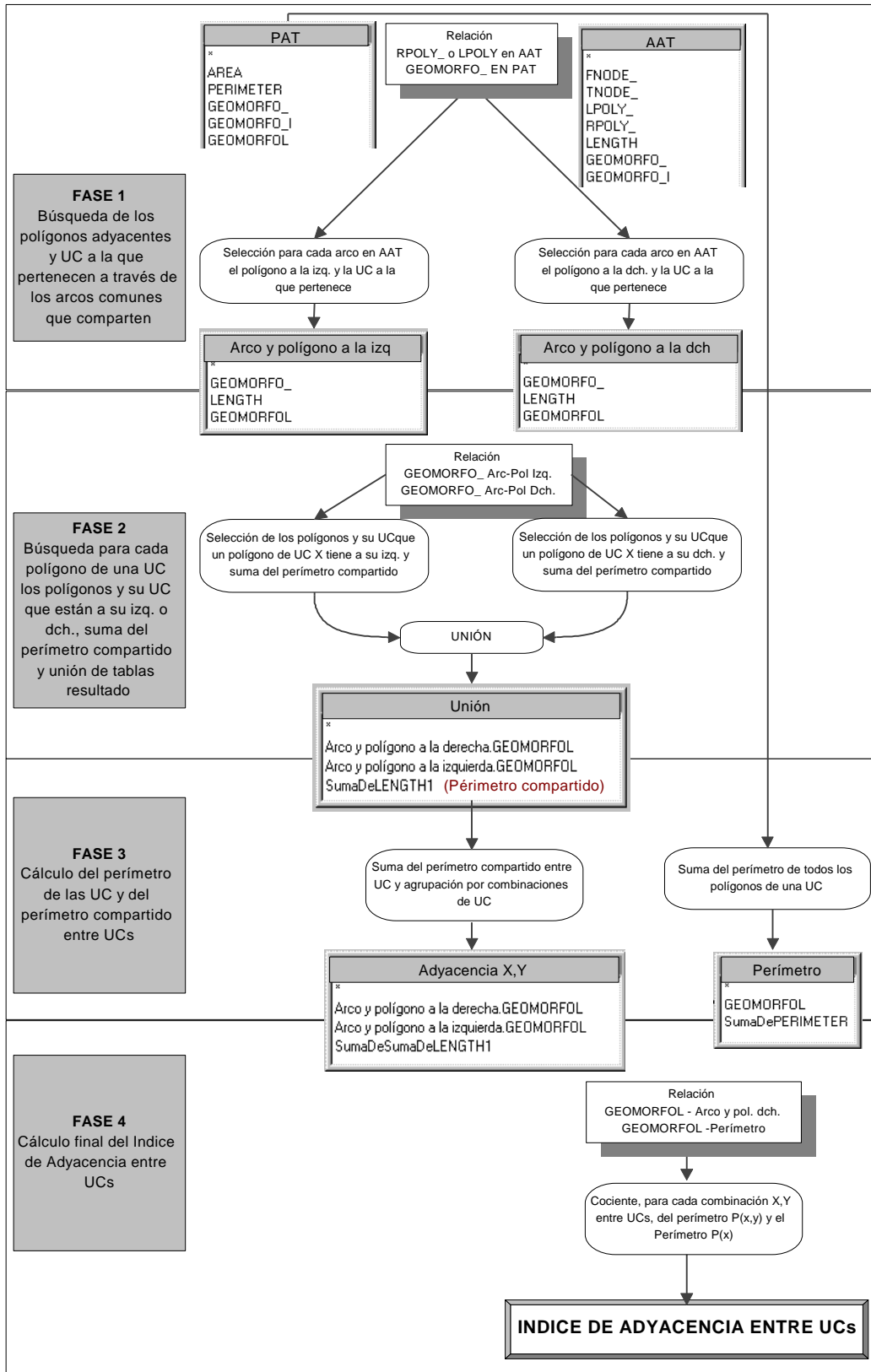


Figura 5.1.7. Diagrama de flujo con el procedimiento utilizado para el cálculo del índice de adyacencia a partir de las tablas de atributos del mapa vectorial de unidades cartográficas.

Tabla 5.1.5. Consultas SQL para la obtención del índice de adyacencia entre unidades del mapa vectorial de Paisaje/Relieve.

| FASE 1 | |
|--|---|
| Consulta Arco y Polígono a la Derecha | Consulta Arco y Polígono a la Izquierda |
| <pre>SELECT DISTINCTROW AAT.GEOMORFO_, AAT.LENGTH, PAT.GEOMORFOL FROM PAT INNER JOIN AAT ON PAT.GEOMORFO_ = AAT.RPOLY_;</pre> | <pre>SELECT DISTINCTROW AAT.GEOMORFO_, AAT.LENGTH, PAT.GEOMORFOL FROM PAT INNER JOIN AAT ON PAT.GEOMORFO_ = AAT.LPOLY_;</pre> |
| FASE 2 | |
| Consulta de unión de tablas de adyacencia derecha-izquierda e izquierda-derecha | |
| <pre>SELECT DISTINCTROW [Arco y polígono a la derecha].GEOMORFOL, [Arco y polígono a la izquierda].GEOMORFOL, Sum([Arco y polígono a la izquierda].LENGTH) AS SumaDeLENGTH1 FROM [Arco y polígono a la derecha] INNER JOIN [Arco y polígono a la izquierda] ON [Arco y polígono a la derecha].GEOMORFO_ = [Arco y polígono a la izquierda].GEOMORFO_ GROUP BY [Arco y polígono a la derecha].GEOMORFOL, [Arco y polígono a la izquierda].GEOMORFOL;</pre> <pre>UNION SELECT DISTINCTROW [Arco y polígono a la izquierda].GEOMORFOL, [Arco y polígono a la derecha].GEOMORFOL, Sum([Arco y polígono a la izquierda].LENGTH) AS SumaDeLENGTH FROM [Arco y polígono a la izquierda] INNER JOIN [Arco y polígono a la derecha] ON [Arco y polígono a la izquierda].GEOMORFO_ = [Arco y polígono a la derecha].GEOMORFO_ GROUP BY [Arco y polígono a la izquierda].GEOMORFOL, [Arco y polígono a la derecha].GEOMORFOL;</pre> | |
| FASE 3 | |
| Consulta de obtención de las Relaciones Adyacencia Pol X Pol Y | Cálculo del perímetro |
| <pre>SELECT DISTINCTROW Unión.[Arco y polígono a la derecha].GEOMORFOL, Unión.[Arco y polígono a la izquierda].GEOMORFOL, Sum(Unión.SumaDeLENGTH1) AS SumaDeSumaDeLENGTH1 FROM Unión GROUP BY Unión.[Arco y polígono a la derecha].GEOMORFOL, Unión.[Arco y polígono a la izquierda].GEOMORFOL;</pre> | <pre>SELECT DISTINCTROW PAT.GEOMORFOL, Sum(PAT.PERIMETER) AS SumaDePERIMETER FROM PAT GROUP BY PAT.GEOMORFOL;</pre> |
| FASE 4 | |
| Consulta del cálculo del índice de adyacencia final | |
| <pre>SELECT DISTINCTROW [Relaciones Adyacencia Pol X Pol Y].[Arco y polígono a la derecha].GEOMORFOL, [Relaciones Adyacencia Pol X Pol Y].[Arco y polígono a la izquierda].GEOMORFOL, [Relaciones Adyacencia Pol X Pol Y].SumaDeSumaDeLENGTH1, perimetro.GEOMORFOL, perimetro.SumaDePERIMETER, [Relaciones Adyacencia Pol X Pol Y]!([SumaDeSumaDeLENGTH1]*100/[perimetro]!([SumaDePERIMETER]) AS Expr1 FROM [Relaciones Adyacencia Pol X Pol Y] INNER JOIN perimetro ON [Relaciones Adyacencia Pol X Pol Y].[Arco y polígono a la derecha].GEOMORFOL = perimetro.GEOMORFOL;</pre> | |
| Consulta del cálculo del índice de adyacencia a barrancos o badlands | |
| <pre>SELECT DISTINCTROW [Indice de adyacencia Final].[Arco y polígono a la derecha].GEOMORFOL, [Indice de adyacencia Final].[Arco y polígono a la izquierda].GEOMORFOL, [Indice de adyacencia Final].Expr1 FROM [Indice de adyacencia Final] WHERE ((([Indice de adyacencia Final].[Arco y polígono a la izquierda].GEOMORFOL)="M2"));</pre> | |

5.1.3.3. Aplicación al cálculo del IA de las UC del mapa vectorial de Paisaje/Relieve del Alt Penedès-Anoia

El programa desarrollado para el cálculo del IA entre UCs de mapas vectoriales ha sido aplicado al mapa de Paisaje/Relieve del Alt Penedès-Anoia (Figura 5.1.8). En la Tabla 5.1.6 se muestran los resultados del IA entre UCs y áreas de barrancos o badlands.

Tabla 5.1.6. Índice de adyacencia entre unidades cartográfica del mapa de Paisaje/Relieve y las áreas de barrancos o badlands (Alt Penedès-Anoia).

| Código Unidad Cartográfica | Índice adyacencia a barrancos (% perímetro) |
|----------------------------|---|
| A | 5.6 |
| B11 | 2.7 |
| B12 | 21.8 |
| B13 | 6.8 |
| B2 | 39.9 |
| B31 | 52.8 |
| B32 | 30.2 |
| B33 | 40.7 |
| B34 | 14.7 |
| B4 | 12.6 |
| C1 | 11.2 |
| C21 | 50.9 |
| C22 | 45.4 |
| C23 | 39.3 |
| C24 | 22.6 |
| D1 | 33.4 |
| D21 | 12.9 |
| D22 | 57.4 |
| D23 | 36.8 |
| D24 | 27.3 |
| D3 | 4.7 |
| E1 | 20.5 |
| E2 | 10.4 |
| E31 | 10.1 |
| E32 | 40.5 |
| E33 | 0 |

El IA de la Tabla 5.1.6, considerado como un atributo de la entidad UC, se analiza cartográficamente en la Figura 5.1.9. Hay que remarcar que la relación puesta de manifiesto en este mapa es una relación global a nivel de UC.

Estos resultados muestran la utilidad del empleo y automatización del cálculo del IA en estudios de erosión. En este caso, el IA muestra las áreas con mayor perímetro de contacto con zonas que sufren particulares procesos de erosión (desprendimiento de paredes por movimientos en masa o deslizamientos, erosión de paredes por los cauces de los barrancos, etc.), lo cual repercute en las áreas adyacentes y en sus usos.

No obstante, el cálculo del IA en el nivel topológico superior de UC, y no en el intermedio de la delineación, puede enmascarar altos valores de IA en delineaciones con pequeña superficie que pertenecen a UCs con un bajo IA global. En este sentido, el cálculo de la adyacencia a nivel de delineación seguiría las mismas pautas que el proceso indicado en la Figura 5.1.7 hasta la fase 2 (inclusive). Este cálculo ha de considerarse como $P(x)$ en la Ecuación 5.1.1 el perímetro de la delineación en la tabla PAT.

El IA a barrancos y badlands no debe tomarse como único indicador del riesgo de erosión en las unidades con un alto valor. Hay que considerar también otros factores como el grado de estabilización de las paredes de los barrancos (Martínez-Casasnovas y Cervera 1996).

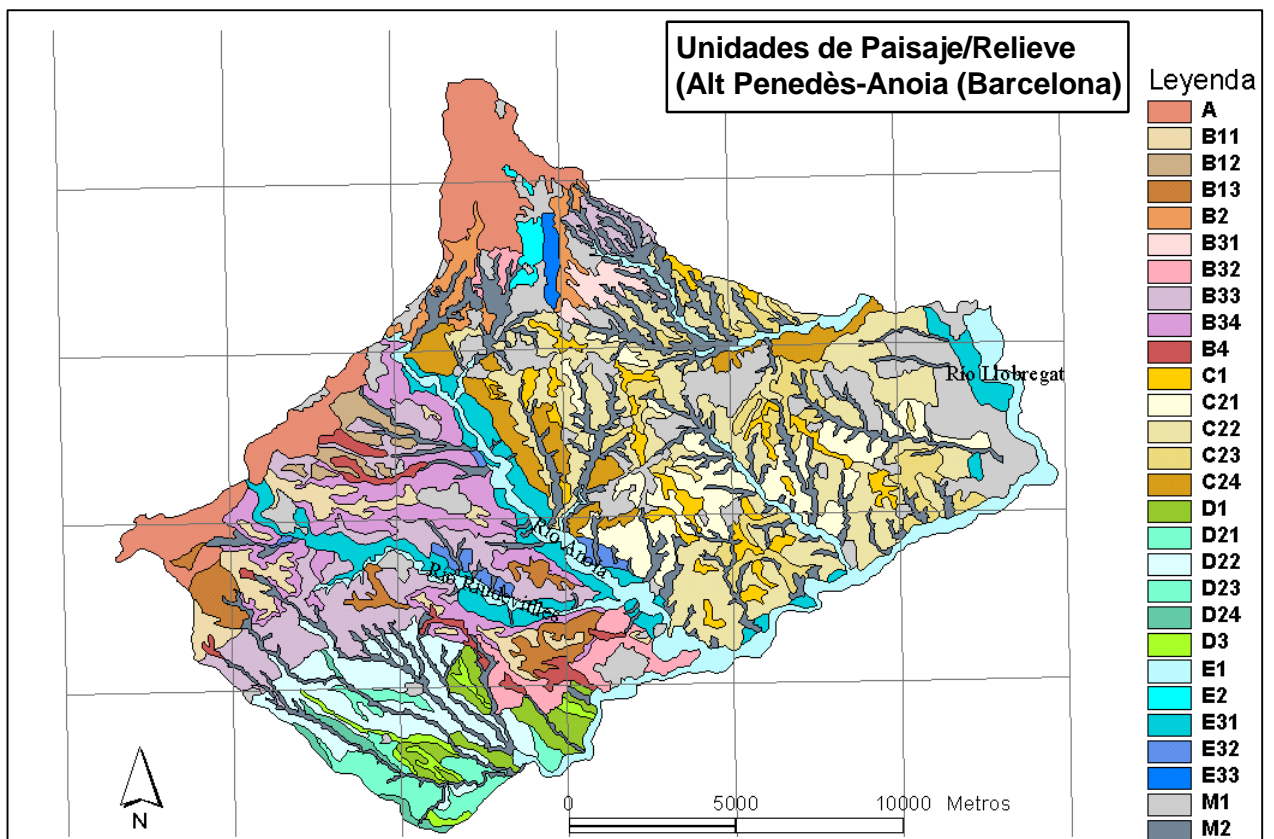


Figura 5.1.8. Unidades de paisaje/relieve (geoformas) del Alt Penedès-Anoia (Barcelona). (Ver descripción de la leyenda en la Tabla 5.1.1).

5.1.4. Conclusiones

Del presente trabajo se desprende que la adecuada manipulación de las relaciones topológicas, que en una estructura vectorial quedan registradas en el nivel inferior de la estructura formal de datos, puede servir para la obtención de relaciones espaciales significativas en el nivel superior, que es en el cual se conciben las relaciones espaciales a nivel del usuario.

Este es el caso de la relación de adyacencia entre unidades cartográficas de mapas vectoriales de áreas. De este tipo es el ejemplo mostrado, relativo a las relaciones de

adyacencia entre unidades de un mapa de unidades de paisaje/relieve. En este caso la relación de adyacencia se ha cuantificado y analizado cartográficamente por medio del denominado índice de adyacencia.

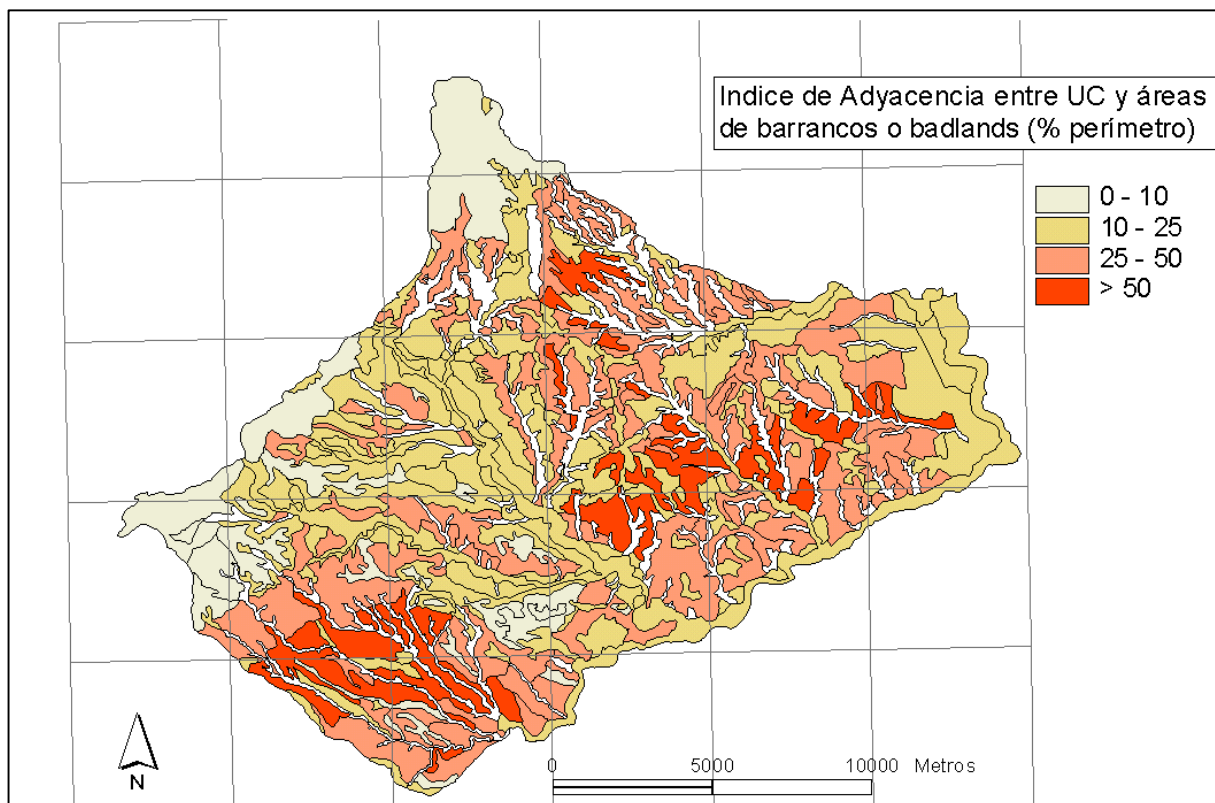


Figura 5.1.9. Índice de Adyacencia entre las unidades cartográficas de paisaje/relieve (geformas) a las áreas de barrancos o badlands (Alt Penedès-Anoia, Barcelona).

La obtención automática de este índice se ha hecho mediante la manipulación de las tablas de atributos del mapa vectorial (PAT y AAT en ArcInfo) con un gestor de base de datos relacional, utilizando lenguaje de consulta estructurado (SQL).

Este índice no solo puede ser obtenido al nivel de clase de objetos área sino también a nivel de individuos de clase o delineaciones, dependiendo de las necesidades del usuario. El índice de adyacencia a nivel de clase puede ser utilizado como descriptor global de las relaciones entre unidades cartográficas, si bien su representación cartográfica puede enmascarar relaciones parciales con diferencias significativas en el valor del índice.

Los resultados obtenidos del cálculo del índice de adyacencia en el área de estudio han mostrado las unidades con mayor perímetro de contacto con las zonas de barrancos y badlands. Sin embargo, este índice no debe tomarse como único indicador del riesgo de erosión en las unidades geomorfológicas con un alto valor del índice de adyacencia. Esta información puede ser útil en la descripción de las unidades de paisaje/relieve.

5.1.5. Referencias bibliográficas

Martínez-Casasnovas, J.A., 1994, *Hydrographic information abstraction for erosion modelling at regional level. A database perspective in a GIS environment*. MSc Thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, Holanda.

Martínez-Casasnovas, J.A. y Molenaar, M., 1995. Aggregation hierarchies for multiple scale representations of hydrographic networks in GIS. *Proceedings of the 17th International Cartographic Conference*, 1: 358-362.

Martínez-Casasnovas, J.A. y Cervera, T., 1996, Gully erosion mapping by remote sensing techniques. A case study in the Anoia-Penedès region (NE Spain). *Primer Congreso Europeo sobre el Control de la Erosión*, Sitges (Barcelona).

Molenaar, M., 1989, Single valued vector maps. A concept in GIS. *Geo-Information Systemes*, 2: 18-26.

Molenaar, M., 1993, Object hierarchies and uncertainty in GIS or Why is standardisation so difficult. *Geo-Information Systemes*, 4:22-28.

Molenaar, M. y Martínez-Casasnovas, J.A., 1996, A formalism for the structural description of vector maps, and its use for multi-scale representations: a hydrographic example. *Cartographica*, 33: 55-63.

Tobler, W.R., 1970, A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*, 46.

Van Smaalen, J.W.N., 1996, Spatial abstraction based on hierarchical reclassification. *Cartographica*, 33: 64-72.

Van Smaalen, H.W.N. y Molenaar, M., 1993. *Feature level for Arcinfo using the Arcinfo-Oracle interface*. Wageningen Agricultural University, K075-702. Wageningen, Holanda.

Zinck, A. y Valenzuela C.R., 1990, Soil geographic database: structure and application examples. *ITC Journal*, 1990-3: 270-294.

Zinck, J.A., 1998, *Physiography and soils*. Soil Survey Courses. Subject matter K6. ITC Lecture Notes SOL-41.

5.2. A cartographic and database approach for land cover/use mapping and generalisation from remotely sensed data.

Martínez-Casasnovas, J.A. A cartographic and database approach for land cover/use mapping and generalisation from remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, (submitted March 1998, reviewed August 1998).

A cartographic and database approach for land cover/use mapping and generalisation from remotely sensed data.

Abstract

Classification of remotely sensed data involves a set of generalisation processes. Reality is simplified to a set of few classes that are relevant for the application being considered. This article introduces an approach for image classification that uses a class hierarchy structure for mapping unit definition at different generalisation levels. This structure is implemented as an operational relational database and allows querying of more detailed land cover/use information from a higher abstraction level, which is the one viewed by the map user. Elementary mapping units are defined on the basis of an unsupervised classification process, in order to uncover the land cover/use classes registered in the remotely sensed data. Mapping unit composition at different generalisation levels is defined on the basis of membership values of sampled pixels to land cover/use classes. Unlike fuzzy classifications, membership values are presented to the user at a mapping unit level.

5.2.1. Introduction

Classification of remotely sensed data, either by visual interpretation or by digital image processing techniques (supervised or unsupervised), involves a set of generalisation processes. In essence, reality is simplified or reduced to a set of few classes, relevant for the application being considered, and having a spatial representation in a map or in a digital spatial data structure.

The four different processes in information abstraction from reality to a data model are classification, class generalisation, aggregation and association (Egenhofer and Frank 1989, Molenaar 1993, Molenaar and Richardson 1994, Martínez-Casasnovas 1994), of which the first two are undertaken during supervised or unsupervised classification of remote sensing images.

Supervised classifications provide a statistical description of land cover based on a class structure and training data provided by the analyst. The classification process starts with the definition of informational classes, followed by the assignment of these classes to pixels. The most commonly used classification method evaluates the likelihood that each pixel belongs to each class based on their spectral and statistical characteristics. Unsupervised classifications attempt to uncover the land cover classes that exist in the image. The multispectral image is classified into a number of spectral classes, without prior knowledge of what they might be. The analyst provides the number of the output spectral classes and indicates the clustering algorithm. After the clustering process, the analyst also needs to assign information labels to the spectral clusters by means of ground sampling procedures, and to determine which clusters need to be merged or to be further defined to achieve a legend according to the purposes of the user.

Neither supervised nor unsupervised methods provide an immediate solution to the problems that a digital classification implies (Chuvieco 1996). The supervised method is

more subjective since the analyst may force the discrimination of classes without a clear spectral meaning (Chuvieco 1996). Also, the supervised method is considered as restrictive, since some existing land cover classes may be unknown by the user prior to the classification process and, therefore, they are not considered in the training data set (Palacio and Luna 1996). Sometimes, the existence of those non-sampled land cover classes may be known and it is a decision of the analyst either to consider them in the classification process or not. In other situations, those classes are known during accuracy assessment, provided that ground truth areas are different from training areas. This represents a loss of spectral information during the image classification process, that some authors have tried to face through fuzzy supervised classification (Wang 1990a, b, Foody 1996) or by In-Process Classification Assessment methods (Eastman 1997).

Unsupervised classifications are sometimes difficult to interpret or to produce results that are related to the user needs. The unsupervised process, however, overcomes some problems related to the knowledge of the spectral response variability of terrain objects. In this respect, the combination of both classification procedures is often advised by using unsupervised classification as an alternative method for spectral signature definition (García and Álvarez 1994, Chuvieco 1996).

From the generalisation process viewpoint, supervised and unsupervised classification procedures involve land cover class and mapping unit definition and generalisation. In supervised classification, the selection of the generalisation level (level of detail) of the informational classes to be sampled is very important and determines the classification results. Several authors have concluded that classification results are often influenced more by previous definition of informational classes than by the criterion and/or the classification algorithm used to discriminate them during the classification process (Story and Campbell 1986, Gong and Howarth 1990, Chuvieco 1996, Palacio and Luna 1996). The statistical and compositional variability of informational classes should be taken into account by sampling elementary field training classes, and then merging or generalising them at a higher level (or superclass level) in the class hierarchy (class generalisation). A very good knowledge of the area and of terrain object spectral response is required for an accurate supervised classification.

Unsupervised classification usually produces a wider range of spectral classes. An appropriate sampling strategy is required for cluster definition. A particular land cover class may be represented in more than one spectral class, and conversely, one spectral class may represent more than one land cover class. Thus, the analyst may merge clusters according to their composition in terms of informational classes and class similarity, or may try to further split clusters when they include more than one land cover class, always depending on the target legend.

A fact being noticed in image classification maps is the lack of references to the user regarding the class generalisation process and aggregation or disaggregation of spectral classes that has taken place. Informational classes are defined at the level of detail that can be recognised at pixel or sub-pixel level (elementary informational classes), e.g. bare agricultural soil or bare industrial soil. Those classes may compose a super class (class at a higher hierarchical level in the classification system), e.g. bare soil, that may be presented in

the final map legend because either the convenience of the user or the impossibility to produce distinct spectral signatures for each elementary class. Also, the lack of references in maps to mapping unit composition in terms of membership values to land cover classes (super classes as well as elementary informational classes) is observed. Information about the composition of super classes and their distribution in the mapping units should be reported so that users will be aware of the purity of the map units (Janssen and van der Wel 1994).

Present methods to assess classification accuracy such as error or confusion matrices can be used to calculate measures such as the proportion of pixels correctly classified, errors of omission and commission, user's and producer's accuracy, coefficients of agreement and hypothesis testing. These indices report on the accuracy of final informational classes but not on the presence of elementary classes and their spatial distribution in the case that final informational classes are super classes. These measures of accuracy, however, have been recognised as valuable tools in judging the fitness of the resulting map for a particular application (Aronoff 1982, Aronoff 1989, Story and Congalton 1986, Janssen and van der Wel 1994, Lark 1995).

In view of these issues, the objective of the present paper is to introduce a conceptual framework for spectral signature class definition and map generalisation. It is based upon definition of elementary informational classes by stratified random sampling of clusters produced by unsupervised classifications. Once defined, clusters and informational classes are generalised according to a hierarchical structure. Clusters are viewed as 'cartographic or mapping units' and may be composed of one or more informational classes. A database model is designed and implemented in a Relational Database Management System (RDBMS) to support the generalisation in a hierarchical structure. This framework allows users to know class and mapping unit composition in terms of elementary informational classes at any level of the generalisation hierarchy. Also, queries about the most probable location of elementary informational classes not represented in the legend at a higher generalisation level can be answered.

5.2.2. Test site and data

An area located in the Alt Penedès-Anoia region (Catalonia, NE Spain) was selected to test the proposed methodology (Figure 5.2.1). This region is mainly dedicated to the cropping of vineyards for wine and sparkling wine ('cava') production. In this area, modern practices have replaced traditional management practices. Old small size parcels are being transformed into bigger parcels, an operation that involves huge soil movements. Residential and industrial areas have grown during the last three decades, due to the nearness to the Barcelona metropolitan area. This region suffers serious problems of erosion, which have been reported by Ramos *et al.* (1991), Porta *et al.* (1994) and Martínez-Casasnovas and Cervera (1996). In addition to sheet erosion, a dense and deep gully network has developed in the area. To locate more stable and higher erosion risk areas, the mapping of vegetation cover on gully walls from remotely sensed data has been explored by Martínez-Casasnovas and Cervera (1996).

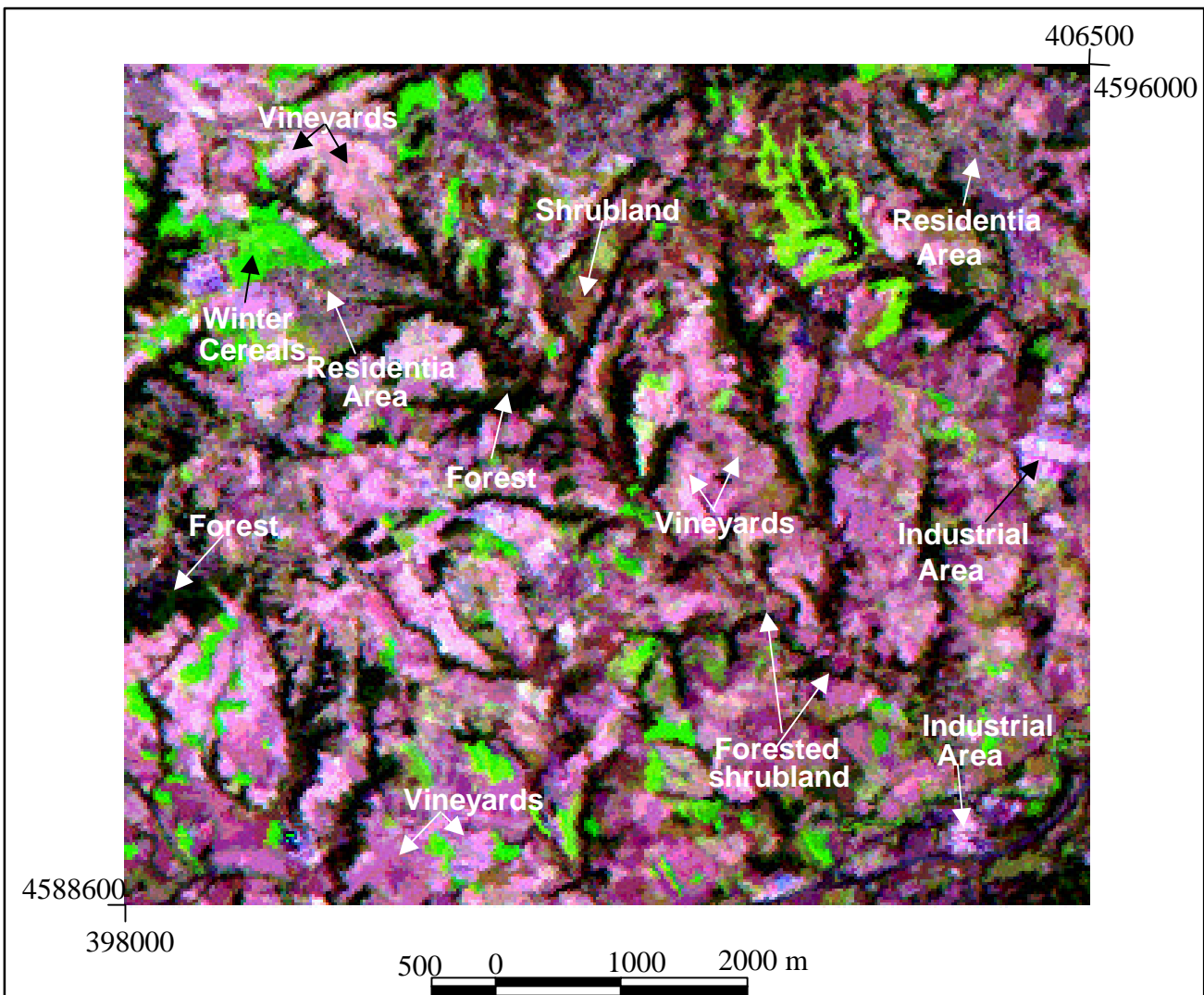


Figure 5.2.1. Landsat TM image of the Alt Penedès-Anoia region (Catalonia, NE Spain). False colour composite red-green-blue 543. March 1993.

A Landsat TM subscene (March 1993), covering an area of 62.9 km² in the study area, was used to test the application of the general procedure. The atmospheric scattering effect was corrected by applying the improved dark-object subtraction technique (Chavez 1988). A quadratic mapping function based on 14 control points and a nearest neighbour resampling were applied for geometric correction. Pixel size was slightly decreased to 25x25 m, in order to match the resolution of a digital elevation model. An overall root-mean-square error less than one pixel was achieved. The image classification results and the digital elevation model were later combined to map vegetation cover on gully walls.

A 1:25 000 scale true colour orthophoto of July 1993, produced by the Cartographic Institute of Catalonia, was used to support fieldwork for ground truth data collection.

5.2.3. Methodology

5.2.3.1. General procedure

A first step in building a hierarchy to support generalisation of image classification results was the definition of basic or elementary terrain object classes. In this article, elementary classes should be interpreted as land cover/use types that can be recognised at the pixel or sub-pixel resolution level. For example, if medium resolution remote sensing data is used (e.g. 20 m resolution SPOT data or 30 m resolution Landsat TM data), a pixel may be described by a unique class (e.g. bare agricultural soil) or may be mixed (e.g. bare agricultural soil and shrubland, in the border area of these classes).

For the definition of the basic information level of the hierarchy an unsupervised classification process was applied. This revealed the existing land cover/use information. The unsupervised process was seeded from a colour composite image, selected from the three-band combinations with the largest Optimum Index Factor (Chavez *et al.* 1982). This index is based on the variance and the correlation among the different bands. The three-band combination having the largest index value is usually selected for colour composition because it should display the most spectral information of the whole set of bands (six spectral bands for the Landsat TM sensor) with the least amount of duplication.

A random sampling procedure, stratified per cluster class, was performed. Each cluster was pixel-sampled, as proposed by Janssen and van der Wel (1994). These authors support that individual pixels are the most appropriate sampling units if a per-pixel classification is performed. They also consider that stratified sampling based on distinguished classes is preferable above other sampling strategies (e.g. random or systematic distribution). A minimum sample of 50 pixels per cluster was used to achieve an accurate estimation of cluster composition (Hay 1979, Congalton 1991, Chuvieco 1996).

The result of this process was the basic mapping generalisation level at the image resolution. This was a many-to-many relationship between clusters and informational classes (land cover/use classes). Clusters should be understood as elementary level cartographic or mapping units. One or more land cover/use classes are represented in a mapping unit and a specific land cover/use class can be included in different mapping units. Mapping units and land cover/use classes are different concepts but both can be organised in a hierarchical way as it is proposed in Figure 5.2.2.

The class generalisation hierarchy structure of Figure 5.2.2 was translated to a database model (figure 3). This model focuses on structuring of data and determination of relationships among data elements according to a relational database approach (Chen 1976). The Relational Database Management Systems Access (Microsoft™) was used to implement the database structure of Figure 5.2.3 in an internal operating model. Finally, Structured Query Language (SQL) was used to analyse elementary terrain information for mapping unit definition and to move up and down through the information generalisation hierarchy.

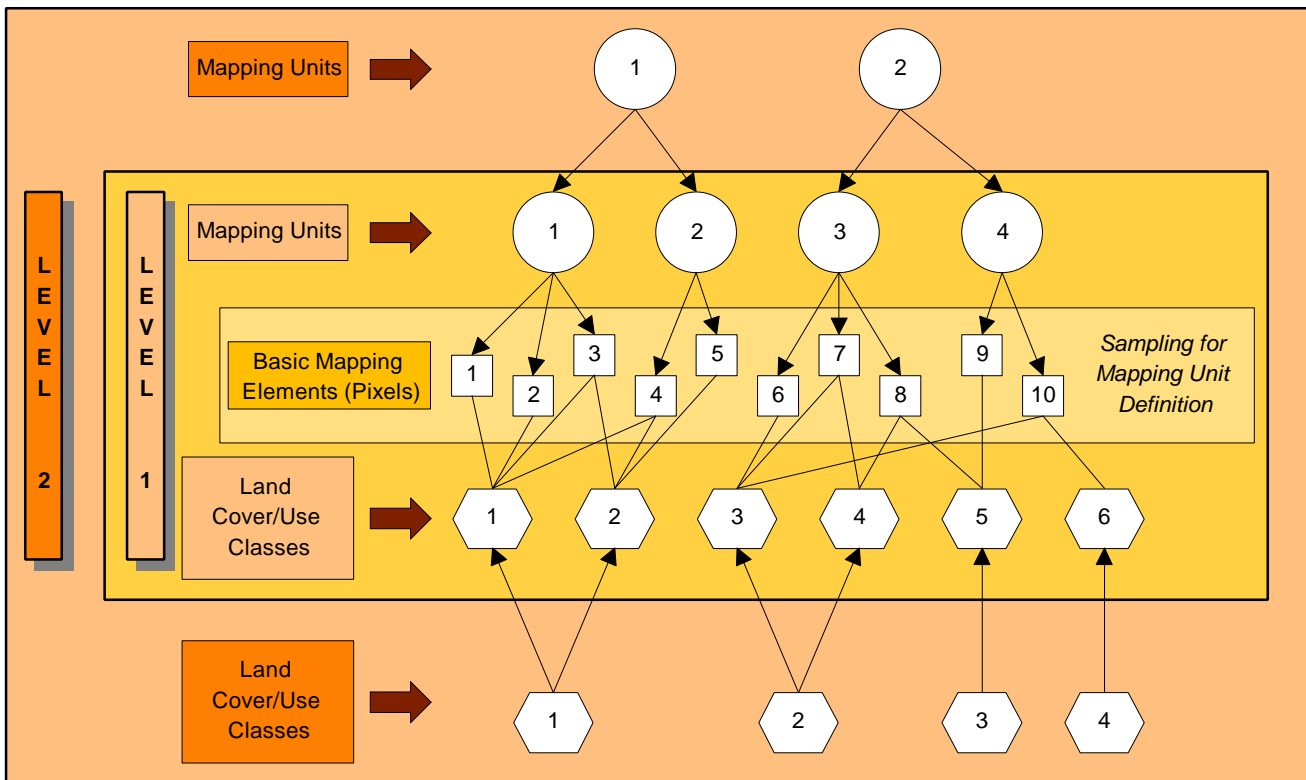


Figure 5.2.2. Generalisation hierarchy structure for land cover/use mapping from remotely sensed data. Level 1 represents the basic level of spatial information (more detailed), that is defined by membership of pixels of spectral classes to elementary land cover/use classes. Level 2 represents a higher level in the generalisation hierarchy (less detailed), that is created by class generalisation and aggregation of mapping units of level 1.

5.2.3.2. Image processing

An unsupervised classification was performed using the ISOCLUST algorithm, implemented in the Idrisi for Windows package (Clark University). This algorithm is an iterative self-organising unsupervised classifier based on a concept similar to the ISODATA routine (Ball and Hall 1965 quoted by Eastman 1997) and cluster routines such as the H-means and K-means procedures (Eastman 1997).

A red-green-blue 543 colour composite was used to seed the clusters for the unsupervised classification. This band combination was preferred to TM bands 4, 5 and 7, which had the highest Optimum Index Factor (26.8) because it also produced a high Optimum Index Factor (25.3), it was more sensitive to vegetation cover variability (Gilbert 1990) and it covered the basic image dimensions of greenness, brightness and moisture content (Eastman 1997).

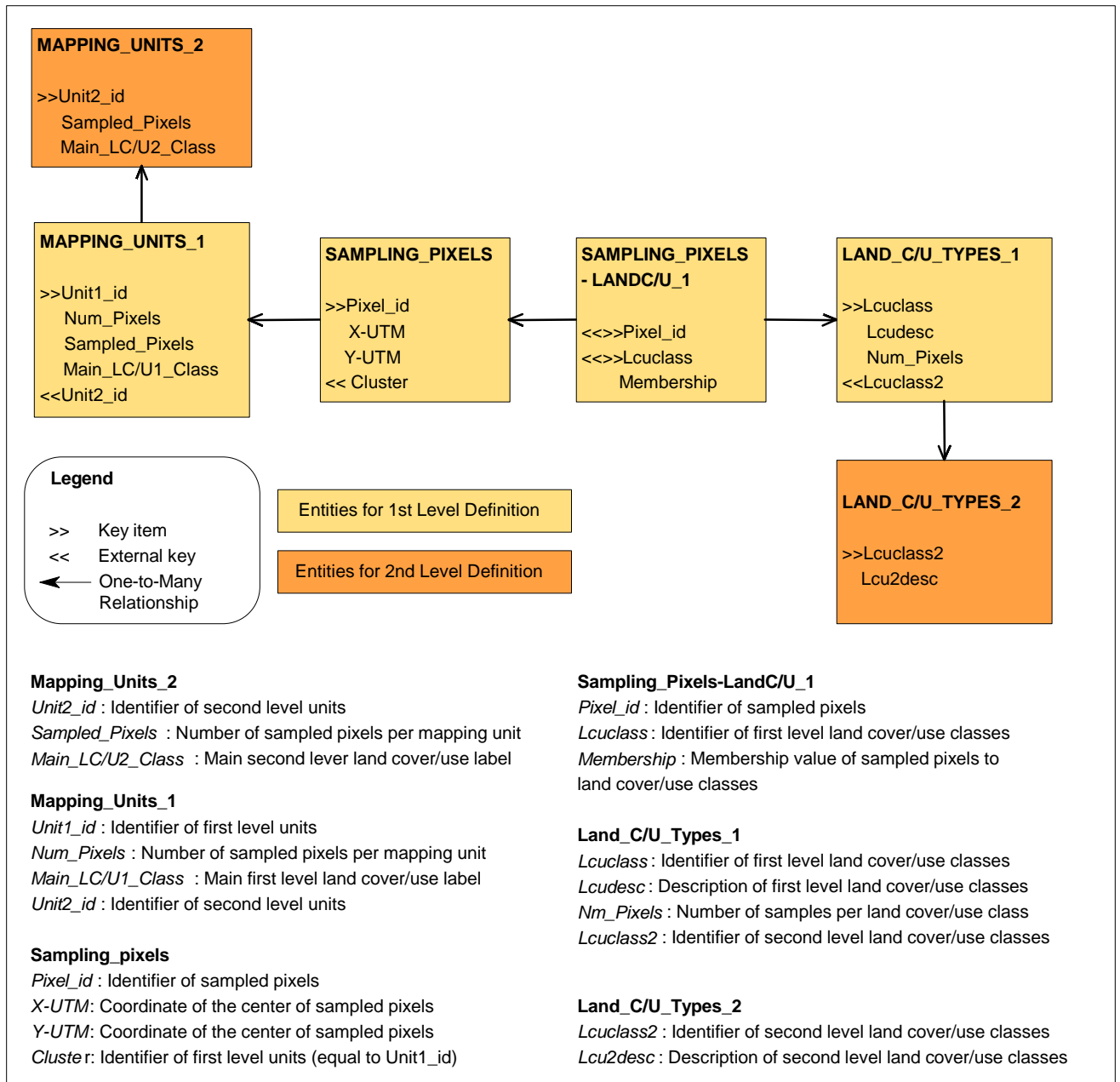


Figure 5.2.3. Relational database model for definition of mapping units at different generalisation levels according to the proposed hierarchy structure of Figure 5.2.2.

The ISOCLUST classifier produced first a histogram that expressed the frequency with which the clusters occurred in the seed image. After examining the histogram, a number of 29 clusters (of a total of 41) was specified as the output of the unsupervised classification. The selected clusters accounted for 99.9 % of the total number of pixels in the seed image. These clusters were used in an iterative maximum likelihood procedure using bands 4, 5, 7, NDVI and principal component analysis (PCA) 1, 2 and 3 as a colour composite. Three iterations were performed before no significant change in output was produced. Bands 4, 5 and 7 were selected because it was the three-band composition with the highest Optimum Index Factor among the 20 possible combinations (band 6 excluded). NDVI was introduced to distinguish vegetated from non-vegetated areas and the PCA colour composite was used

because of its effect on enhancing differences among similar spectral signature classes such as bare soils, residential/industrial areas and vineyards.

5.2.3.3. Definition of mapping units

A total of 1146 pixels (1.14% of the area covered by the image) were sampled for ground truth data collection by means of field work and with the help of 1:25 000 scale orthophoto for geo-referencing. Those pixels were distributed among the 29 clusters. Random samples per cluster were taken depending on the frequency of the clusters in the image. The number of pixels sampled were: 50 pixels for clusters with more than 1000 mapped pixels, 25 pixels for clusters between 100 and 1000 mapped pixels and 20 pixels for clusters with less than 100 mapped pixels.

Sampled pixels were given a membership value to land cover/use classes depending on the area each class occupies in the portion of land assumed as the instantaneous field-of-view of to the pixel. This created a many-to-many relationship between pixels and land cover/use classes. It was split in two one-to-many relationships to be handled by the Relational Database Management System used (Access, MicrosoftTM). Accordingly, the creation of a new entity, called *Sampling_Pixels-LandC/U_1*, was needed (Figure 5.2.3).

The composition of map units for the different generalisation levels was computed according to Equation 1. This equation was implemented by means of a set of connected SQL statements, that operate in the internal database model implemented in the Relational Database Management System at the levels indicated in Figure 5.2.3.

Equation 5.2.1
$$\mathbf{Mmu}_{i,x} = (\mathbf{SMp}_{j,x}) / \mathbf{SP}_i$$

Where,

$\mathbf{Mmu}_{i,x}$ = Membership value of mapping unit *i* to land cover/use class *X*.

$\mathbf{Mp}_{j,x}$ = Membership value of pixel *j*, sampled in mapping unit *i*, to land cover/use class *X*.

\mathbf{SP}_i = Number of sampled pixels in mapping unit *i*.

The definition of both the land cover/use class and the mapping unit hierarchies was needed prior to definition of mapping units at higher generalisation levels. The decision about land cover/use classes making up land cover/use super classes was based on class similarity according to the map purpose: assessment of erosion risk. The decision to define the mapping unit hierarchy was based on the target map legend and composition of basic mapping units.

The legend of the final land cover/use map was presented from a user's point of view, with an indication of membership of mapping units to land cover/use super classes. A classification accuracy assessment was also performed using a confusion matrix. The accuracy assessment not only considered one land cover/use super class per mapping unit in the cases of associations but the land cover/use super classes forming the association. That means, values in the confusion matrix were sums of membership values of mapping units to

land cover/use super classes or vice versa. Single membership values linearly vary between 0 and 1, (1 in the case of a pure pixel and a value between 0 and 1 in the case of mixed pixels).

5.2.4. Results

5.2.4.1. Definition of the basic generalisation level

The unsupervised classification approach produced 29 clusters or mapping units. Two types of pixels were identified during ground data collection for mapping unit definition: a) pure pixels, 81.5% of the sampled pixels, where the cover/use classes within the instantaneous field-of-view of the pixel were all of one class, and that class was homogeneous at the spatial resolution of the sensor; and b) mixed pixels, 18.5% of the sampled pixels, where the boundaries between two or more different cover/use classes occurred within a single pixel.

The basic land cover/use classes identified in both pure or mixed pixels are described in Table 5.2.1. The most frequent classes were vineyards, grassland and shrubland and winter cereals, which together represent 58% of the sampled pure pixels. Other important classes were built-up areas, bare soil parcels and forested shrubland.

The most frequent combinations in mixed pixels were grassland and shrubland and bare soil parcels, built-up areas and vineyards, forested shrubland and bare soil parcels, vineyards and cereals or bare soil parcels. Those accounted for 70.7% of the total mixed pixels that were sampled.

The application of Equation 1 at level 1 produced the components of basic mapping units. This information can be either linked with the raster land cover/use map to assess membership of individual pixels to land cover/use classes, or it can be presented to the user in the form of a map legend that considers different types of mapping units, depending on their purity. In this respect, the proposed mapping unit types are: a) units with 70% or more membership to a unique land cover/use class, that will be referred to as ‘consociations’, like the most pure mapping units in soil maps (van Wambeke and Forbes 1985); b) units with two main land cover/use classes covering 70% or more of the unit, that will be referred to as ‘associations’; and c) units with more than two representative land cover/use classes, that will be referred to as ‘complexes’.

According to this adopted criterion, Table 5.2.2 shows the legend of the land cover/use map of the Alt Penedès-Anoia region for the basic generalisation level. Percentages in Table 5.2.2 indicate membership of mapping units to land cover/use classes, which was different from membership of individual pixels to land cover/use classes. This way of mapping unit definition allows the map producer to know purity of units and to determine the ones to be merged in order to make a higher level unit.

Table 5.2.1. Land cover/use classes identified at pixel or sub-pixel resolution in the Alt Penedès-Anoia region.

| Class | Land cover/use class | Description |
|-------|--|---|
| 1 | Bare gully walls and badlands | Gully walls and badlands without vegetation cover |
| 2 | Semivegetated gully walls and badlands | Gully walls and badlands, less than 30% vegetation cover (shrubland): <i>Brachipodium ramosum</i> , <i>Ulex parviflorus</i> , <i>Genista sp.</i> , <i>Juniperus oxicedrus</i> , <i>Rosmarinus officinalis</i> , <i>Thymus vulgaris</i> , <i>Quercus coccifera</i> , <i>Pinus halepensis</i> |
| 3 | Grassland and shrubland | Grassland and shrubland, 30-60% vegetation cover, typically southern oriented areas: <i>Brachypodium ramosum</i> , <i>Ulex parviflorus</i> , <i>Genista sp.</i> , <i>Rosmarinus officinalis</i> , <i>Thymus vulgaris</i> , <i>Spartium junceum</i> , <i>Lepidium graminifolium</i> , <i>Quercus coccifera</i> |
| 4 | Shrubland | Shrubland, 50-75% vegetation cover, typically north and eastern oriented areas: <i>Brachipodium phoenicoides</i> , <i>Vicia sp.</i> , <i>Spartium junceum</i> , <i>Diplotaxis eruroides</i> , <i>Shorgum halepense</i> , <i>Genista sp.</i> , <i>Rosmarinus officinalis</i> , <i>Quercus coccifera</i> , <i>Quercus ilex</i> |
| 5 | Riparian shrubland | Riparian shrubland, 65-80% vegetation cover, typically bottom gully valleys: <i>Rubus ulmifolius</i> , <i>coriaria myrtifolia</i> , <i>Arundo donax</i> , <i>Populus sp.</i> |
| 6 | Forested shrubland | Forested shrubland, 65-80% vegetation cover, typically north and northwestern oriented areas: <i>Brachipodium phoenicoides</i> , <i>Coriaria myrthifolia</i> , <i>Vicia sp.</i> , <i>Spartium junceum</i> , <i>Genista sp.</i> , <i>Pistacia lentiscus</i> , <i>Rosmarinus officinalis</i> , <i>Quercus ilex</i> , <i>Pinus halepensis</i> , <i>Pinus pinea</i> |
| 7 | Forested areas | Forested areas, 65-80% vegetation cover, typically northern oriented areas: <i>Pinus halepensis</i> , <i>Pinus pinea</i> , <i>Quercus ilex</i> , <i>Quercus coccifera</i> |
| 8 | Vineyards | Old traditional or modern vineyard plantations, without vegetation cover at the date of the image |
| 9 | Vineyards (parcels with weeds) | Old traditional or modern vineyard plantations, with weeds cover between vine rows |
| 10 | Vineyards (new plantations in level parcels) | Recent modern vineyard plantations in level parcels |
| 11 | Almond tree plantations | Almond tree plantations |
| 12 | Peach tree plantations | Peach tree plantations |
| 13 | Winter cereals | Well-developed winter cereals: wheat or barley |
| 14 | Winter cereals (under-developed) | Under-developed winter cereals: wheat or barley |
| 15 | Bare soil parcels | Bare soil parcels and recent level parcels |
| 16 | Bare soil parcels with scarce weed cover | Bare soil parcels and recent level parcels with scarce weed cover |
| 17 | Residential or industrial built-up areas | Residential (urban and recreational) or industrial built-up areas |
| 18 | Industrial or urban areas (bare soil) | Bare industrial or urban parcels |
| 19 | Roads | |
| 20 | Road banks | |

Table 5.2.2. Legend of the Land cover/use map of the Alt Penedès-Anoia region (generalisation level 1).

| Mapping unit | % Area (*) | Land cover/use class description (**) | Main inclusions (**) |
|--------------|------------|---|--|
| 1 | 9.5 | Grassland and shrubland (70%) | Bare-semivegetated gully walls and badlands (9.2%), Residential and industrial built-up areas (8%) |
| 2 | 12.0 | Association of Forested shrubland (60%) and Forested areas (40%) | |
| 3 | 13.1 | Vineyards (98%) | |
| 4 | 4.5 | Grassland and shrubland (77.8%) | Vineyards (6%) and Residential and industrial built-up areas (4%) |
| 5 | 7.2 | Complex of Residential and industrial built-up areas (32%), Bare soil parcels (29.6%) and Grassland and shrubland (15.6%) | Vineyards (9%) and Almond tree plantations (5.8%) |
| 6 | 2.8 | Vineyards (70%) | Bare soil parcels (17%) and Grassland and shrubland (4%) |
| 7 | 7.6 | Grassland and shrubland (80.4%) | Forested shrubland (8%) and Bare gully walls and badlands (6%) |
| 8 | 6.7 | Vineyards (98%) | |
| 9 | 3.8 | Complex of Residential or industrial built-up areas (59%), Bare soil parcels (11.8%) and Grassland and shrubland (10%) | Roads (6%) |
| 10 | 5.0 | Association of Forested shrubland (54.8%) and Shrubland (22%) | Grassland and shrubland (8%) and Forested areas (4%) |
| 11 | 5.8 | Vineyards (81%) | Residential and industrial built-up areas (12%) |
| 12 | 3.4 | Vineyards (70%) | Bare soil parcels (29%) |
| 13 | 2.3 | Grassland and shrubland (74%) | Winter cereals (under-developed) (12%) and Riparian shrubland (8%) |
| 14 | 0.8 | Association of Winter cereals (61.2%) and Grassland and shrubland (16.4%) | Bare soil parcels (6%), Residential and industrial built-up areas (6%) (6%) |
| 15 | 1.2 | Association of Winter cereals (57.5%) and Grassland and shrubland (18.7%) | Forested shrubland (8.3%), Vineyards (6.25%) and Bare soil parcels (6.25%) |
| 16 | 2.0 | Grassland and shrubland (81%) | Vineyards (5.1%) |
| 17 | 1.7 | Winter cereals (100%) | |
| 18 | 0.6 | Winter cereals (100%) | |
| 19 | 0.6 | Winter cereals (100%) | |
| 20 | 1.8 | Association of Residential and industrial built-up areas (66%) and Bare soil parcels (12%) | Vineyards (12%) |
| 21 | 0.9 | Bare soil parcels (72%) | Residential-industrial built-up areas and roads (16%), Vineyards (6%) |
| 22 | 1.3 | Association of Bare soil parcels (44%) and Vineyards (44%) | Almond tree plantations (4%) |
| 23 | 0.4 | Winter cereals (100%) | |
| 24 | 0.5 | Association of Winter cereals (37.5%) and Vineyards (27.5%) | Grassland and shrubland (17%) |
| 25 | 1.0 | Complex of Residential and industrial built-up areas (42%), Grassland and shrubland (22.5%), Bare soil parcels (16.7%) and Forested shrubland (14.6%) | |
| 26 | 0.4 | Association of Residential and industrial built-up areas (60%) and Bare soil parcels (14.6%) | Semivegetated gully walls and badlands (6.7%) |
| 27 | 1.4 | Complex of Bare soil parcels (31.8%), Grassland and shrubland (30.6%) and Vineyards (21.5%) | Forested shrubland (10.2%) |
| 28 | 0.7 | Complex of Bare soil parcels (30%), Grassland and shrubland (26.5%) and Vineyards (12.5%) | Roads (5%) |
| 29 | 0.7 | Bare soil parcels (72%) | Industrial-urban (bare soil parcels) (24%) |

(*) % of the area of the mapping unit over the total study area.

(**) Percentages are referred to the total area of the mapping unit.

5.2.4.2. Definition of the second generalisation level and classification accuracy assessment

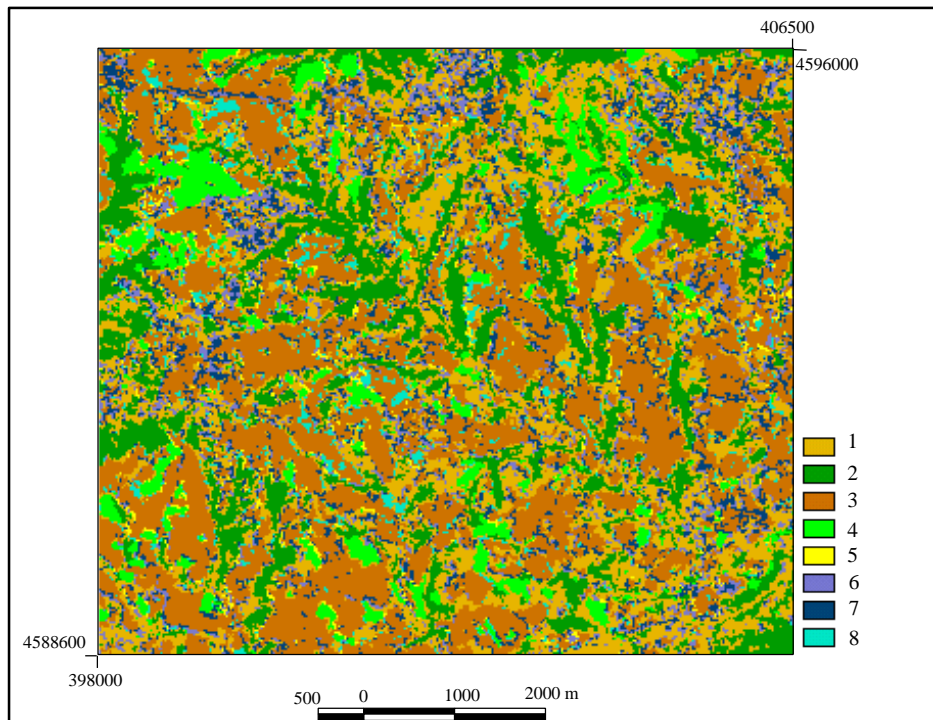
A more simplified legend than the one of Table 5.2.2 is usually presented to the user. This requires previous determination of basic mapping units that have to be merged, and it is guided by the target map legend to achieve. In the present case study, nine land cover/use super classes were identified as relevant for the application and used to define the class hierarchy to support mapping unit generalisation (Table 5.2.3).

Table 5.2.3. Land cover/use class hierarchy considered for the Alt Penedès-Anoia case study.

| Land cover/use super class (level 2) | Land cover/use super class description | Land cover/use class (level 1) |
|--------------------------------------|--|--------------------------------|
| 1 | Bare or semivegetated gully sidewall and badlands | 1, 2 |
| 2 | Grassland and shrubland | 3 |
| 3 | Forested shrubland and shrubland | 4, 5 |
| 4 | Forested shrubland and forested areas | 6, 7 |
| 5 | Vineyards | 8, 9, 10 |
| 6 | Almond and peach plantations | 11, 12 |
| 7 | Winter cereals | 13, 14 |
| 8 | Bare soil parcels (agricultural or industrial/urban) | 15, 16, 18 |
| 9 | Industrial and residential built-up areas | 17, 19, 20 |

According to the target map legend of Table 5.2.3 and looking at the basic mapping units composition of Table 5.2.2, eight mapping units were considered for the second level of generalisation. The decision on what basic mapping units had to compose a higher level mapping unit was not automated at this stage. The analyst was the one driving the process by looking at both the target map legend and the composition of the basic mapping units. Consociations were preferred above associations or complexes, since the former represent the most pure mapping units from the map user’s point of view. Figure 5.2.4 shows the final land cover/use map and the associated legend. Information on basic mapping units making up second level units has been included.

The legend of figure 4 shows the composition of the mapping units of the land cover/use map and user’s accuracy in a more comprehensible way for the map user than a confusion matrix. Information on commission errors or map producer’s accuracy is not given in the map user’s legend. Land cover/use super classes that appeared only as minor components in mapping units had the highest omission errors (Figure 5.2.4), and were explicitly detailed in Table 5.2.4.



| Legend | | | | |
|-------------------------------|-------------------|---|--|--------------------------------|
| Mapping unit (level 2) | % Area (*) | Land cover/use class description (**) | Main inclusions (**) | Mapping units (level 1) |
| 1 | 25.8 | Grassland and shrubland (76.6%) | Bare or semivegetated gully sidewalls and badlands (4.9%) and Vineyards (4.2%) | 1, 4, 7, 13, 16 |
| 2 | 17.0 | Forested shrubland and forested areas (79.4%) | Forested shrubland and shrubland (16%) and Grassland and shrubland (4%) | 2, 10 |
| 3 | 31.8 | Vineyards (83.2%) | Bare soil parcels (agricultural and industrial/urban) (11.4%) | 3, 6, 8, 11, 12 |
| 4 | 6.0 | Winter cereals (83.3%) | Grassland and shrubland (5.1%) and Vineyards (4.4%) | 14, 15, 17, 18, 19, 23, 24 |
| 5 | 1.6 | Bare soil parcels (agricultural and industrial/urban) (84%) | Industrial and residential built-up areas (8%) and Vineyards (5%) | 21, 29 |
| 6 | 6.1 | Association of Industrial and residential built-up areas (64.8%) and Bare soil parcels (agricultural and industrial/urban) (15.6%) | Vineyards (6.9%) and Grassland and shrubland (5.2%) | 9, 20, 26 |
| 7 | 7.7 | Complex of Industrial and residential built-up areas (35.3%), Bare soil parcels (agricultural and industrial/urban) (25.4%) and Grassland and shrubland (17.8%) | Vineyards (7.4%) and Forested shrubland and forested areas (6.1%) | 5, 25 |
| 8 | 3.4 | Complex of Bare soil parcels (agricultural and industrial/urban) (37.7%), Vineyards (31.6%) and Grassland and shrubland (16.5%) | Forested shrubland and forested areas (6.1%) | 22, 27, 28 |

(*) % of the area of the mapping unit over the total study area.

(**) Percentages are referred to the total area of the mapping unit.

Figure 5.2.4. Land cover/use mapping units of the Alt Penedès-Anoia region, (second generalisation level).

Table 5.2.4. Accuracy assessment of the Land cover/use map of the Alt Penedès-Anoia region, (generalisation level 2).

| CLASSIFIED DATA (Mapping units level 2) (**) | REFERENCE DATA (Land cover/use super classes) (*) | | | | | | | | | Sum | User's accuracy | Error of Commission |
|---|---|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|--------|-----------------|---------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | | | |
| 1 | 12.2 | 190.8 | 6.5 | 7.3 | 10.5 | 1.0 | 7.5 | 5.5 | 7.7 | 249.0 | 76.6 | 23.4 |
| 2 | 0.6 | 4.0 | 16.0 | 79.4 | | | | | | 100.0 | 79.4 | 20.6 |
| 3 | | 3.2 | | | 208.0 | 2.0 | | 28.5 | 8.3 | 250.0 | 83.2 | 16.8 |
| 4 | 1.2 | 10.0 | | 5.0 | 8.5 | | 161.7 | 4.0 | 3.6 | 194.0 | 83.4 | 16.6 |
| 5 | 1.0 | 0.5 | | | 2.5 | | | 42.0 | 4.0 | 50.0 | 84.0 | 16.0 |
| 6 | 3.0 | 6.0 | 1.0 | 1.0 | 8.0 | 2.6 | | 18.9 | 74.5 | 115.0 | 81.2 | 18.8 |
| 7 | 1.5 | 13.2 | 1.5 | 4.5 | 5.5 | 2.9 | | 18.8 | 26.1 | 74.0 | 78.5 | 21.5 |
| 8 | 1.0 | 18.8 | 1.0 | 7.0 | 36.0 | 2.0 | 0.5 | 45.0 | 2.7 | 114.0 | 87.5 | 12.5 |
| Sum | 20.5 | 146.5 | 26.0 | 104.2 | 279.0 | 10.5 | 169.7 | 162.7 | 126.9 | 1146.0 | | |
| Producer's accuracy | 0.0 | 0.0 | 76.6 | 76.2 | 0.0 | 90.4 | 79.3 | 87.5 | 95.3 | | | |
| Error of Omission | 100.0 | 100.0 | 23.4 | 23.8 | 100.0 | 9.6 | 20.7 | 12.5 | 4.7 | | | |

Proportion of pixels correctly classified (shaded cells): 81.4%
 Overall error of commission: 18.3%
 Overall error of omission: 43.9%

(*) The reference data represents the land cover/use super classes described in Table 5.2.3.

(**) The classified data represent the mapping units, whose components described in the legend of Figure 5.2.4.

The confusion matrix shows an overall accuracy of 81.4%, according to the adopted map legend. Omission errors were higher than commission errors, since some representative land cover/use super classes were considered as mapping unit inclusions (minor components).

5.2.5. Discussion

The proposed method for a mapping hierarchy using remote sensing imagery as input improves the user's knowledge on main and minor unit components, and may be used to produce new maps at different aggregation levels.

An unsupervised classification method was used. The bands and the unsupervised algorithm used to obtain the basic mapping units (units of level 1) could be arguable. The quality of the classification would not probably be very different by simply using the original non-thermal bands. From the mapping unit definition viewpoint, what is more important is the use of the unsupervised method above the supervised one since it attempts to uncover the land cover classes that are registered in the spectral data.

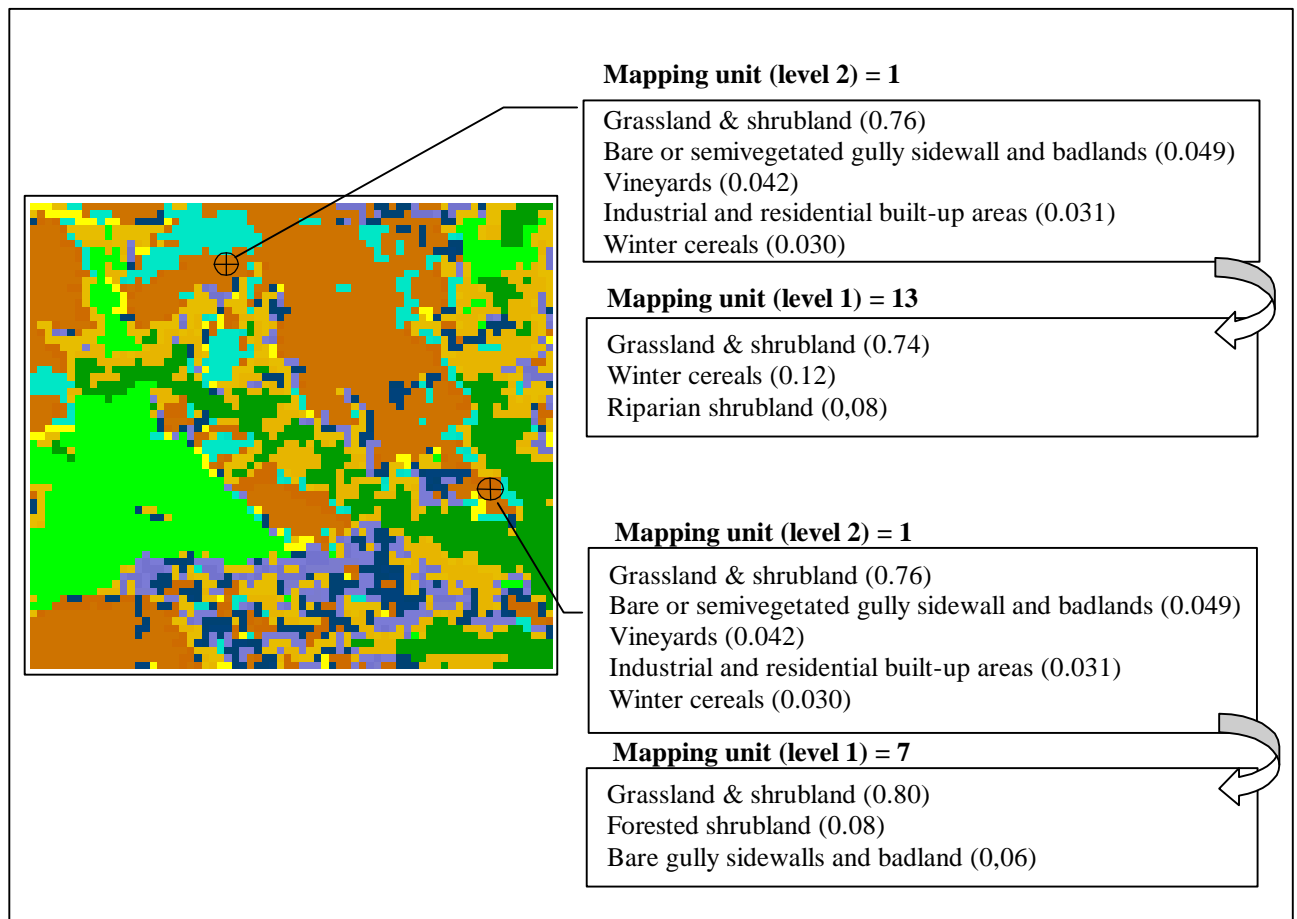


Figure 5.2.5. Example of querying from the second to the first generalisation level.

The use of consociations, associations and complexes as mapping units is not a new approach. It relates to other research fields, particularly to soil mapping (Wambeke and Forbes 1985). This approach is useful to structure the type of mapping units that result from unsupervised classifications. Consociations are the most pure mapping units. Associations are usually the result of the aggregation of spectral classes that correspond with distinct land cover/use classes, and which are merged because of a decision of the analyst or of the map user. Complexes are usually units that group land cover/use classes which are difficult to discriminate from the spectral data used.

The approach proposed in the present paper to define mapping units is different from the use of primary and secondary labels (Woodcock *et al.* 1996, Ludin and Harrison 1997). In the scheme proposed by these authors, secondary labels are evaluated from a set of polygons defined from a segmentation of a classified image or from a classified image segmented by land parcel boundaries. The mapping units are not inherent to the spectral data that the image contains and the image is used to attach information to spatial units defined by other means. In the proposed approach main components of mapping units are similar to primary labels and minor components or inclusions are similar to secondary labels, but primary and secondary labels are different from super classes and elementary land use classes, which have to do with the class generalisation level being considered.

The important cover/use classes were clearly distinguished in the present case study despite using data when the vines had not yet sprouted (Figure 5.2.4). Confusion existed in the classification of built-up areas, bare soil parcels and young vineyard plantations. These units, where confusion existed, form complexes. Two complexes were needed to separate typical mixtures: bare soil parcels and grassland and shrubland with built-up areas, and bare soil parcels and grassland and shrubland with vineyards. These are typically border areas between these classes and were difficult to discriminate.

The method that was used to assess the classification accuracy is slightly different to the traditional error or confusion matrix approach (Story and Campbell 1986, Gong and Howarth 1990, Chuvieco 1996, Palacio and Luna 1996). Omissions and commission errors were measured on a different basis since reference data (land cover/use classes) were compared to classified data as they refer to the components of the mapping units, that result from the unsupervised classification and aggregation of spectral classes. It may produce high errors of omission in land cover/use classes that are not main components in mapping units and only appear as minor components.

An advantage of the proposed mapping unit generalisation hierarchy, above conventional methods of presenting image classification results, was the possibility for the user to query the basic thematic level, to identify elementary class membership of a given pixel belonging to a higher level unit. The ability to undertake queries was the result of the relationships between the different information levels in the defined hierarchy (Figure 5.2.2 and Figure 5.2.3), as illustrated in Figure 5.2.5.

Like all labelling methods, the proposed one is not exempt from subjectivity. Map production was guided by the map purpose and the analyst or map user must to decide about the level of class hierarchy and mapping unit hierarchy to implement. Variations on the basic land cover/use classes or mapping units to merge change the output map and legend. This can be viewed as an advantage, since the basic information registered in the raster map and in the database can be used to produce different purpose maps. The assessment of classification accuracy or those different maps is possible because of the inheritance of the class membership information available from a lower level to a higher level of the generalisation hierarchy structure.

5.2.6. Conclusions

An approach for image classification that considers information abstraction structures such as class generalisation hierarchies, in order to guide mapping unit definition from data collection to information presentation, has been presented.

Several aspects of the proposed method might be viewed as advantageous. From the user's point of view, the map legend reports a more detailed mapping unit composition than usual legends, which only present the main land cover/use classes as labels. Although confusion matrices also carry information about mapping unit components, only generalised main components can be expressed. Information to the user is not also as explicit as in the proposed method. Here the user can decide the level of detail to query. The generalisation hierarchy allows transparency of information from one level to another. The user can obtain knowledge of basic mapping unit components from queries at a higher level. It also allows querying for location of land cover/use classes that are not main mapping unit labels. The output is accompanied by the corresponding unit membership value.

Basic mapping units were the product of an unsupervised classification. Each decision that is taken during the clustering process will vary the output (e.g. input bands, seeding, classifier type), but the date of the image will significantly influence the land cover/use classes that can be distinguished. In the case study presented, the use of multitemporal data would probably have produced a more accurate land cover/use map.

Some aspects related to the proposed method remain unexplored. Perhaps, one of the most interesting would be the complete automation of the generalisation hierarchy after ground truth data collection. On the basis of membership values of basic mapping units to land cover/use classes, the system would compute the combinations of related or similar mapping units in terms of cover/use class components (according to the classification system) that produce a minimum overall classification error. The user would only supervise the land cover/use class hierarchy, since this information can vary depending on the cover/use classes existing in different areas.

Acknowledgements

This research was supported by the Spanish Dirección General de Ciencia y Tecnología, and was carried out in the Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl de la Universitat de Lleida, in the context of the project: 'Rainfall kinetic energy and erosivity in vineyard areas in the Mediterranean basin (Anoia – Penedès): Modelling of erosive processes by gullies'. The author also acknowledges the anonymous referees for their useful comments and corrections which improved the paper.

References

- ARONOFF, S., 1982, Classification accuracy: A user approach. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **48**, 1299-1307.
- ARONOFF, S., 1989, *Geographic Information Systems: A management perspective*, (Ottawa: WDL Publications).
- CHAVEZ, P.S., BERLIN, G.L. Jr. and SOWERS, L.B., 1982, Statistical methods for selecting Landsat-MSS ratios. *Journal of Applied Photogrammetric Engineering*, **8**, 23-30.
- CHAVEZ, P.S., 1988, An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, **24**, 459-479.
- CHEN, P.P., 1976, The entity-relationship model – Toward a unified view of data. *ACM Transactions on Database Systems*, **1**, 9-36.
- CHUVIECO, E., 1996, *Fundamentos de teledetección espacial*, 3a Edición (Madrid: Rialp).
- CONGALTON, R.G., 1991, A review of assessing the accuracy of classifications of remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, **37**, 35-46.
- EASTMAN, J.R., 1997, *Idrisi for Windows User's Guide. Version 2.0*, (Worcester: Clark University).
- EGENHOFER, M.J. and FRANK, A.V., 1989, Object-oriented modelling in GIS: Inheritance and propagation. *Auto-Carto*, **9**, 588-598.
- FOODY, G.M., 1996, Approaches for the production and evaluation of fuzzy land cover classifications from remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, **17**, 1317-1340.
- GARCÍA, M.C. and ÁLVAREZ, R., 1994, TM digital processing of a tropical forest region in south-eastern Mexico. *International Journal of Remote Sensing*, **15**, 1611-1632.

GILABERT, M.A., 1990, *Caracterización radiométrica, en el intervalo espectral solar, de cultivos cítricos. Modelo geométrico de reflectividad de aplicación en teledetección*, PhD Dissertation, (Valencia: University of Valencia).

GONG, P. and HOWARTH, P.J., 1990, An assessment of some factors influencing multispectral land-cover classification. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **56**, 597-603.

HAY, A.M., 1979, Sampling designs to test land-use map accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **45**, 529-533.

JANSSEN, L.L.F. and VAN DER WEL, F.J.M., 1994, Accuracy assessment of satellite derived land-cover data: A review. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **60**, 419-426.

LARK, R.M., 1995, Components of accuracy of maps with special reference to discriminant analysis on remote sensor data. *International Journal of Remote Sensing*, **16**, 1461-1480.

LUDIN, A.N.M. and HARRISON, A.R., 1997, An assessment of primary and secondary labels in land use maps derived from remotely sensed data. In *Observations & Interactions. 23rd Annual Conference and Exhibition of the Remote Sensing Society*, Reading, UK, 2-4 September 1997, (Reading: Remote Sensing Society), pp. 316-321.

MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A., 1994, *Hydrographic information abstraction for erosion modelling at regional level. A database perspective in a GIS environment*. MSc. Thesis, (Wageningen: Wageningen Agricultural University).

MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A. and CERVERA, T., 1996, Gully erosion mapping by remote sensing techniques. A case study in the Penedès-Anoia region (NE Spain). *I European Congress on Erosion Control, Sitges, Spain, 29-31 May 1996*.

MOLENAAR, M., 1993, Object hierarchies and uncertainty in GIS or why is standardisation so difficult? *Geo-Informationssysteme*, **4**, 22-28.

MOLENAAR, M. and RICHARDSON, D.E., 1994, Object hierarchies for linking aggregation levels in GIS. *Proceedings of ISPRS Commission IV, Athens, US, May-June 1994. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, **30**, 610-617.

PALACIO, J.L. and LUNA, L., 1996, Improving spectral results in a GIS context. *International Journal of Remote Sensing*, **17**, 2201-2209.

PORTA, J., RAMOS, C. and BOIXADERA, J., 1994, Mechanical measures for runoff management and erosion control in vineyards of NE Spain. In *Conserving soil resources. European perspectives*, Edited by R.J. Rickson, (Wallingford: CAB International), pp. 369-378.

RAMOS, C., PORTA, J. and BOIXADERA, J., 1991, Rainfall characteristics and soil losses in vineyards in the NE Spain. *ESSC Seminar on Combating Erosion in Vineyards*, Trier, Germany, 22-25 May 1991.

STORY, M.H. and CAMPBELL, J.B., 1986. The effect of training data on classification accuracy. *ACSM-ASPRS Annual Convention, Washington, D.C., US, 16-21 March. Technical Papers*, **4**, 370-379.

STORY, M.H. and CONGALTON, R.G., 1986, Accuracy assessment: A user's perspective. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **52**, 397-399.

WAMBEKE, A. VAN and FORBES, T., 1985, *Guidelines for using Soil Taxonomy in the names of soil map units*. S.M.S.S. Technical Monograph N. 10. (Washington, D.C.: USDA).

WANG, F., 1990a, Fuzzy supervised classification of remote sensing images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **28**, 194-201.

WANG, F., 1990b, Improving remote sensing image analysis through fuzzy classification representation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **56**, 1163-1169.

WOODCOCK, C.E., GOPAL, S. and ALBERT, W., 1996, Evaluation of the potential for providing secondary labels in vegetation maps. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **62**, 393-399.

5.3. Automatic delineation of drainage networks and elementary catchments from Digital Elevation Models.

Martínez-Casasnovas, J.A. (1) and H. J. Stuver (2). 1998. Automatic delineation of drainage networks and elementary catchments from Digital Elevation Models. *ITC Journal*, 1998-3/4 (in press).

(1) Department of Environment and Soil Science, University of Lleida (Spain).

(2) Department for Geographic Information Processing and Remote Sensing, Wageningen Agricultural University, Wageningen (The Netherlands).

Automatic delineation of drainage networks and elementary catchments from Digital Elevation Models

Abstract

This paper explains a method to automatically obtain drainage networks and the elementary catchments of the drainage network elements from Digital Elevation Models (DEMs), in front the traditional manner (extraction of hydrographic information from aerial photo-interpretation or from topographic maps). At a given resolution, a DEM is used to derive the drainage network and the elementary catchments by applying flow direction, flow accumulation and watershed functions. Three main aspects are addressed in this paper: (1) the establishment of a threshold area value (A_t) to derive the best fit drainage network of an area from a given DE; (2) to generate a GIS data structure with the outlets of the elementary catchments to depict the boundaries of the elementary catchments; and (3) to develop a program that uses the capabilities of the GIS program Arcinfo (a raster-vector GIS), to obtain a drainage network within a given drainage basin and derive the elementary catchments according to the proposed methodology. Automating the obtention of the spatial representation of drainage networks and elementary catchments is important since these entities are terrain objects nested in a hierarchical aggregation structure. This structure connects different aggregation levels of hydrographic information. It can also be useful for automatic generalisation (Martínez-Casasnovas 1994).

Keywords: Drainage network, Catchment delineation, Threshold area values, DEMs, GIS.

5.3.1. Introduction

Maps and digital spatial databases have the purpose to portray and identify features of the Earth's surface as faithfully as possible within the limitations imposed by scale.

The representation of hydrographic information is important, not only important because of the fact to depict the most reliable representation in a map but because of the use of this information in terrain analysis, resource and environmental management, hydrological studies, etc. For example, the drainage network provides a skeleton for all the features shown on a topographic map (Böhme 1988), it indicates the major landform structure of an area and, sometimes, a better-known phenomena than other features (Mulders 1987, Robinson *et al.* 1978). Hydrographic information is also one of the first subjects to be considered when generalising detail information for inclusion on smaller scale maps (Böhme 1988, Richardson 1993).

Usually, hydrographic information is represented by means of a set of line and/or areas features and a list of attributes, which describe the relevant characteristics of the depicted information. Different entities are often recognised. The area upon which water falls, and the network through which it travels to an outlet is referred to as a drainage system. A catchment or drainage basin is an area from which water, sediments and dissolved materials flow to a common outlet as concentrated runoff (Dunne and Leopold 1978). The boundary between two catchments is referred to as a drainage divide or catchment boundary. A

elementary catchment is that upstream area flowing to an outlet as overland flow, without including channel flow from upstream catchments. The drainage network consists of a set of channels or drainage network elements by which water flows in a concentrated manner. These drainage network elements are usually represented by lines. A difference is established between stream and drainage networks. A stream network includes permanent and perennial well-defined channels whilst a drainage network also includes the main runoff lines. The elements of a drainage network can be ordered (classified) according to the number of tributaries. Two common ordering methods are the proposed by Strahler (Strahler 1957) and the proposed by Shreve (Shreve 1966). All these concepts are represented in Figure 5.3.1.

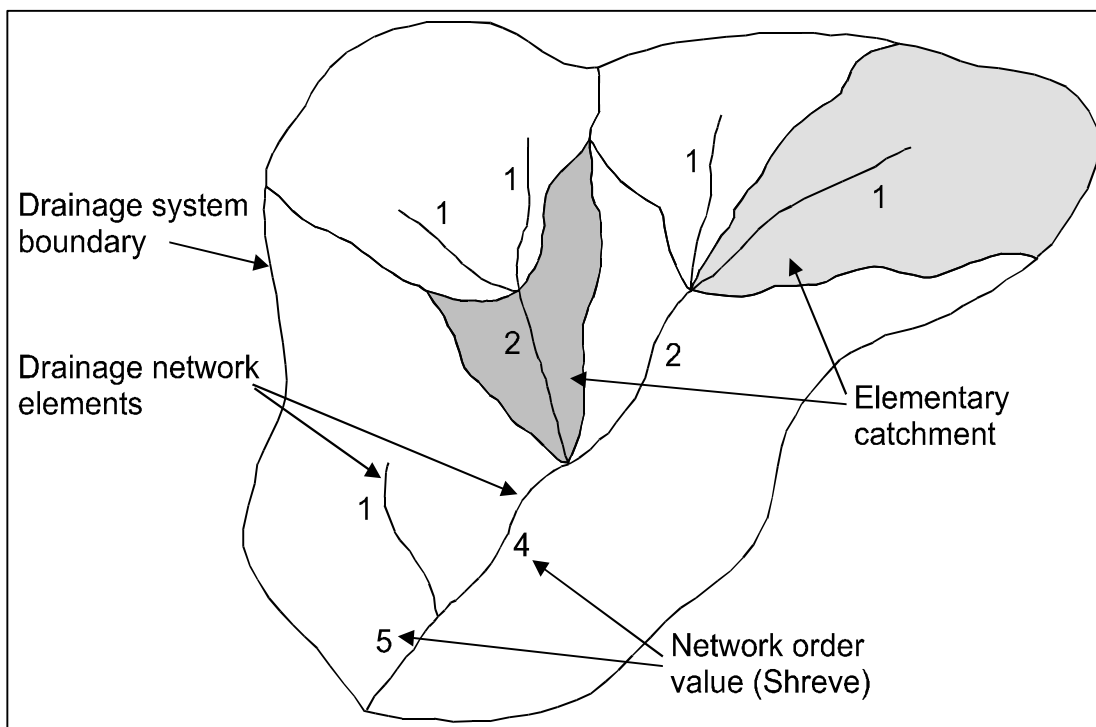


Figure 5.3.1. Representation of hydrographic terrain characteristics.

A catchment is considered to be a basic spatial object to refer terrain information to because of several principal reasons (Chorley 1969):

- 1) It is a limited, convenient and usually clearly defined and unambiguous topographic unit, available in a nested hierarchy of scales on the basis of stream ordering (Figure 5.3.2).
- 2) It provides the basis to link different aggregation levels of terrain information, particularly at regional level (Shrahler 1956, Ichoku *et al.* 1996, Martínez-Casasnovas 1994, Molenaar and Martínez-Casasnovas 1996).
- 3) It reflects the upstream geologic and hydrologic character of a watershed.
- 4) It is a physical process-response system that is open to a cascade of inputs and outputs and viable as spatial basis for landform analysis.
- 5) It also constitutes the basic area unit, within which morphometric characteristics can be collected, organised and analysed, particularly those of dominant fluvial erosive origin.

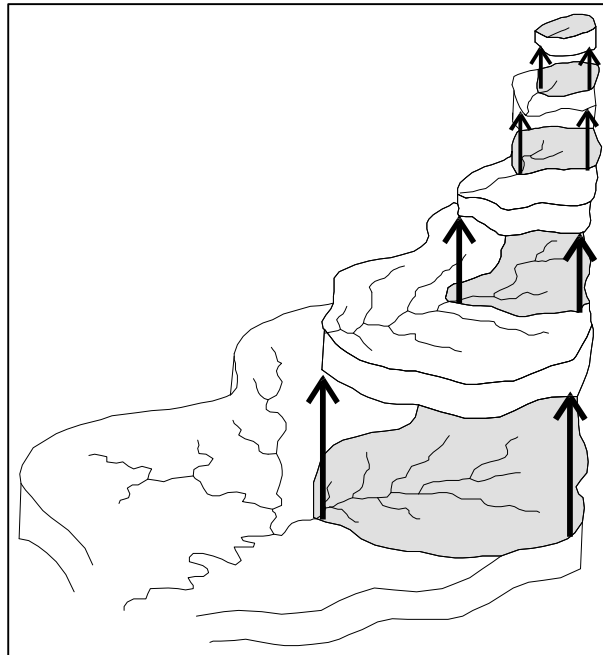


Figure 5.3.2. Nested hierarchy of drainage basins (after Marsh 1991).

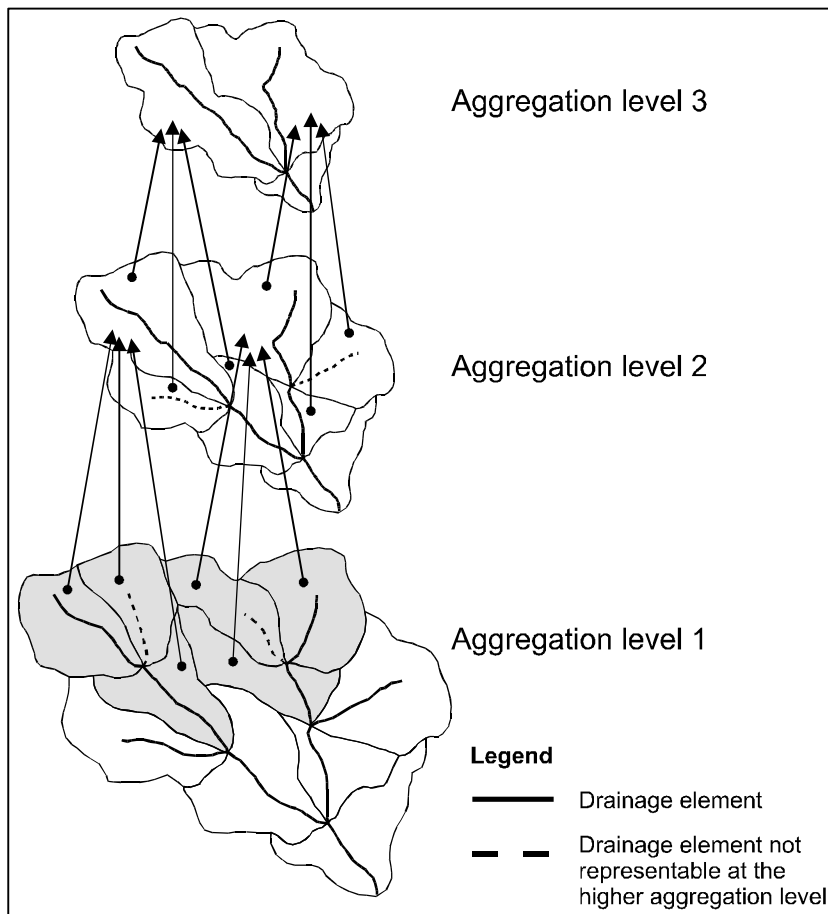
For these reasons, Martínez-Casasnovas (1994) proposed a discretization method of catchments that allows automatic generalisation through a hierarchical aggregation structure implemented in a GIS environment. The method takes into consideration the drainage network elements that can be interpreted from aerial photographs. From these elements, the elementary catchments are depicted (Figure 5.3.3). The hierarchical aggregation structure was used to determine the erosion severity class of each elementary catchment, on the basis of morphometric characteristics of the drainage elements and the catchment characteristics, at different resolution levels.

Until recently, delineation of drainage networks and catchments has been made from relief information (contour lines) in topographical maps or from aerial photo-interpretation (Dunne and Leopold 1978, van Zuidam 1986, Böhme 1988, Mulders 1987, Klinghammer and Loránd 1991). Since the advent of GIS, this usual cartographical representation of topography has been gradually substituted by digital representations in the form of digital elevation models (DEMs) (Gandolfi and Bischetti 1997). This also has stimulated the development of automatic procedures to extract topographic as well as hydrological information, such as slope, curvature, drainage network, catchment delineation, flow direction, flow accumulation, etc. In this respect, regular grid or raster DEMs have been usually used for extraction of this type of information (O'Callaghan and Mark 1984, Jenson and Domingue 1988, Moore *et al.* 1991, Tarboton *et al.* 1991, Felicísimo 1994).

Although technological advances allow to automatically delineate drainage networks or catchments, still several problems are found, as when this information is derived from

topographic maps or aerial photographs. One of the main problems is to determine which elements make-up the most reliable drainage network at a given scale for a specific purpose. From these drainage network elements, catchments are built. Ideally, all drainage network elements should be considered. However, at a given scale, only the drainage network elements bigger than the spatial resolution of the DEM can be depicted. Also the criteria of the observer may have a significant influence in determining the drainage network elements (Chorley *et al.* 1984, Meijerink 1988). Other authors have accomplished the detection of drainage networks from digital satellite images, based on the knowledge of the spatial behaviour of shading with respect to streams and other topo-morphological features (Ichoku *et al.* 1996). This technique could produce the basic stream network structure from which elementary catchments are derived, but at present GIS functions have shown more efficient and reliable for this purpose.

Figure 5.3.3. Drainage elements, elementary catchments and



aggregation hierarchy (after Martínez-Casasnovas 1994).

Three approaches have been formulated for the automatic recognition of drainage network elements (Tarboton *et al.* 1991, Da Ros and Borga 1997). Of these approaches, the most commonly used procedure is the based on the O'Callaghan's and Mark's algorithm (O'Callaghan and Mark 1984). This consists in the assignment of a drainage direction to each cell in the DEM and the following derivation of the drainage network. For the present

research, these functions were available in the raster GIS environment of ArcInfo's Grid module. The three main functions used for this purpose are flow direction, flow accumulation and determining a watershed from a given source.

First, the flow direction function determines the direction of flow from each cell in the raster data structure (Grid) using a DEM as an input. Hereafter, the flow direction is determined by finding the direction of the steepest descent from each cell taking into account its eight neighbouring cells. Cells with undefined flow (sinks) must be filled first in order to have a so-called sinkless DEM. The flow direction grid is used to compute the flow accumulation of each cell. The value stored in the cell represents the accumulated number of cells flowing into the cell. The resulting grid outlines the drainage network. A threshold value must be applied for its final delineation: all cells with a flow accumulation value above the threshold will belong to the drainage network and cells with a value below the threshold will not.

This threshold value is referred to as a threshold area (A_t) (Rieger 1993), that represents the minimum support area required to drain to a point for water to flow in a concentrated manner and for a channel to form. Different drainage networks are obtained depending on this threshold area. A high threshold area value will create a drainage network with the main streams. A low threshold area value will also create drainage network elements where flow tends to accumulate but possibly where incision caused by concentrated runoff is not detected (i.e. in-filled valley bottoms). According to the objectives of the user's application, different threshold area values can be applied to obtain the best fit drainage network. In this respect, several authors have pointed out that a variable threshold area should be considered for areas with different relief characteristics (Da Ros and Borda 1997, Gandolfi and Bischetti 1997), and have suggested the use of a slope-dependent threshold area. However, no experimental evidence of a relationship between slope and threshold area has been found.

In this respect, the first part of the present paper is addressed to find a slope or other topographical-variable dependent function to establish the flow accumulation threshold area (A_t) to derive the best fit drainage network for a given area from a DEM. Drainage networks of sample catchments, obtained from aerial photo-interpretation, are used as reference data to set-up the threshold area.

Once the best fit drainage network is drawn, catchments can be automatically delineated from a DEM using the flow direction grid and a source grid from where the upstream cells are detected. These upstream cells distinguish the area of the catchment. A problem arises in the identification of the outlets of elementary catchments from the drainage network data structure. This structure only recognises the nodes or junctions of the stream elements as possible outlets to compute the elementary catchments (Figure 5.3.4). Regarding this problem, the second part of the paper concerns the generation of a GIS data structure with the outlets of the elementary catchments to depict their boundaries (drainage divides).

Finally, a program to automate the delineation of the drainage network of a given catchment and to derive the elementary catchments from a DEM, according to the proposed methodology, is developed using the capabilities of ArcInfo (a raster-vector based GIS).

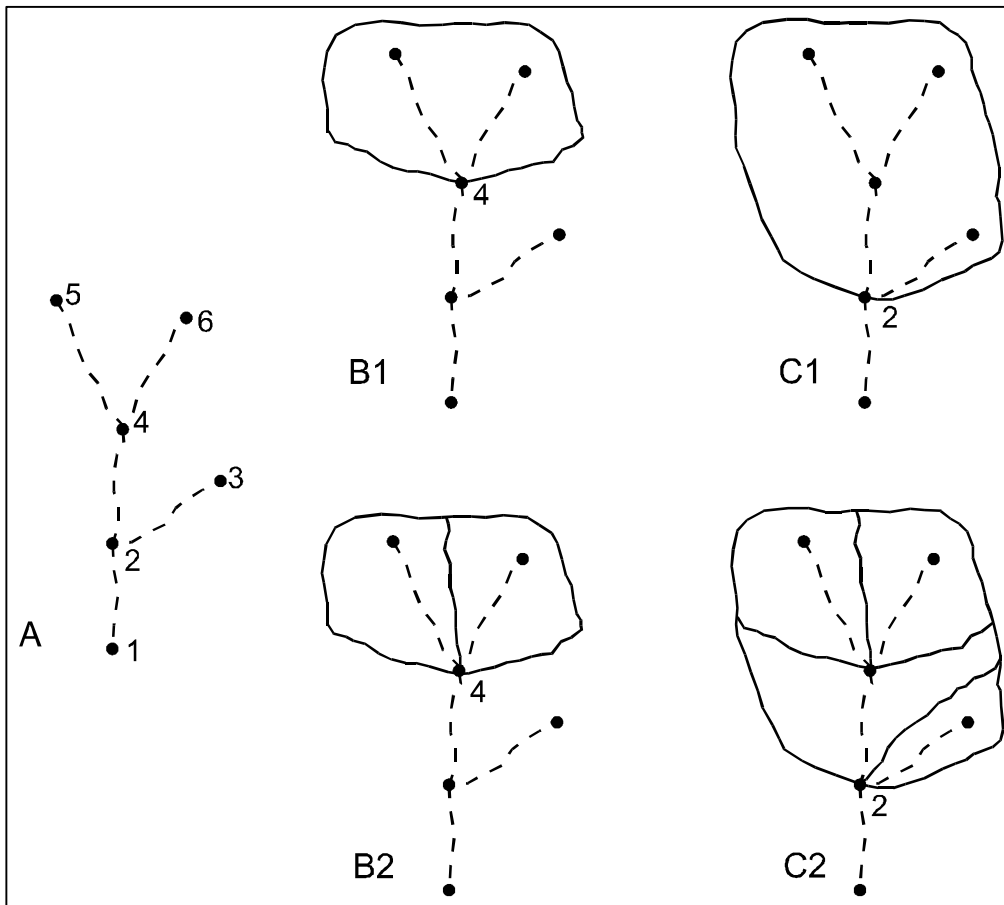


Figure 5.3.4. (A) Representation of a drainage network in a vector data structure (the nodes or junctions are labeled). (B1) and (C1) Catchments if nodes 4 and 2 are respectively used as source points of watersheds. (In a raster data structure the same catchment's boundaries are derived if the nodes are considered as source cells). (B2) and (C2) Elementary catchments that should be obtained according to Martínez-Casasnovas (1994).

The resulting methodological approach and the program were applied to two test areas in the Alt Penedès - Anoia region (NE Spain), using a DEM with a 45 m resolution.

5.3.2. Methodology

5.3.2.1. Delineation of the best fit drainage network from a DEM

As introduced above, the delineation of the drainage network of an area from a DEM requires the establishment of a threshold area. In the present research, several comparisons between a drainage network obtained from aerial photo-interpretation and drainage networks obtained by using different threshold area values were made, in order to set the threshold area.

Two test areas, located in the Alt Penedès – Anoia (Catalonia, NE Spain) (Figure 5.3.5), were considered to apply the proposed methodology. These areas were selected because of their different landscape and drainage pattern as consequence of the different lithologic characteristics and geomorphologic forming processes.

The area to the north of the Anoia river (Fig 5), called Piera-Masquefa area, is located in a high dissected valley-glacis landscape unit. Terrain is typically undulating to hilly, with slope degrees between 10-20%. The area is highly affected by gully erosion: 23% of the area has been affected by deep gullies and ravines. The drainage network shows a clear dendritic pattern. The area to the south of the Anoia river, called Pla del Penedès area, is located in a low dissected valley-glacis landscape unit, where wide alluvial surfaces and gentle slopes are the main relief units. The slope degrees are between 3-15%. The drainage pattern is mainly parallel. Gully erosion is less intense than in the Piera-Masquefa area: 10% of the area has been affected by gullies and trenches excavated into the recent alluvial sediments.

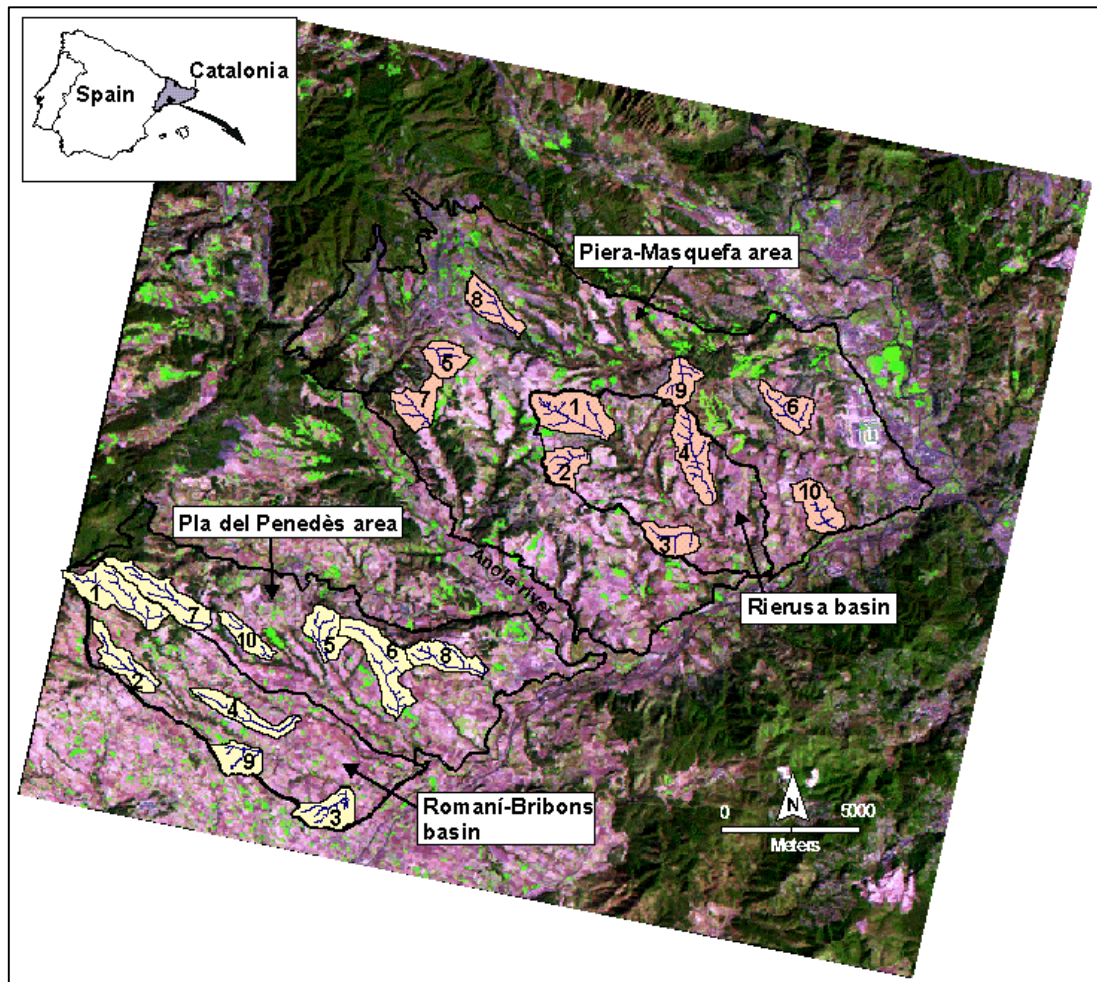


Figure 5.3.5. Location of the test areas and sample catchments that were considered to establish the threshold area (A_t) to derive the best fit drainage network.

Since the areas show different drainage network characteristics, a threshold area to delineate the best fit drainage network for each of them was considered. To obtain these values, 10 sample catchments of each test area were selected (Figure 5.3.5). For those

sample catchments, the drainage network obtained by aerial photo-interpretation and the drainage networks obtained by using different threshold area values were compared. The considered threshold area values were between 10 cells (20250 m²) and 100 cells (202500 m²). Aerial photographs (stereoscopic pairs) with an approximate scale 1:30.000 were used to obtain the reference drainage networks. Also a DEM of 45 m resolution, produced by the Cartographic Institute of Catalonia, was used as source data to automatically obtain the drainage networks and the catchments. The decision on the threshold area producing the most faithfully drainage network for each sample catchment was taken on the basis of visual comparison.

Once the threshold area for each sample catchment was established, a least-squares regression between the threshold area values and different topographical variables (slope, relief amplitude and relative relief), extracted from the DEM was computed. The idea behind this operation was to obtain different equations to estimate the best fit threshold area for each test area, with the only input of easy derived topographical variables.

5.3.2.2. Delineation of the elementary catchments of the drainage network elements

The methodology used takes into account the catchment data structure as proposed by Martínez-Casasnovas (Martínez-Casasnovas 1994, Martínez-Casasnovas and Molenaar 1995). This means that the catchments of the drainage network elements, whether they be permanent or perennial, are interpreted from the aerial photographs at a given scale. The catchment of each drainage network element is considered as the area draining overland-flow to any point of the element.

To derive these elementary catchments, the outlet of each element has to be identified. The identification of these outlet points in a vector data structure is not easy since individual catchment areas cannot be obtained from each junction of the network (Figure 5.3.6). To overcome this problem, these junctions are converted into raster data structure and used as input in a neighbour operation to determine the outlet cells of each elementary catchment.

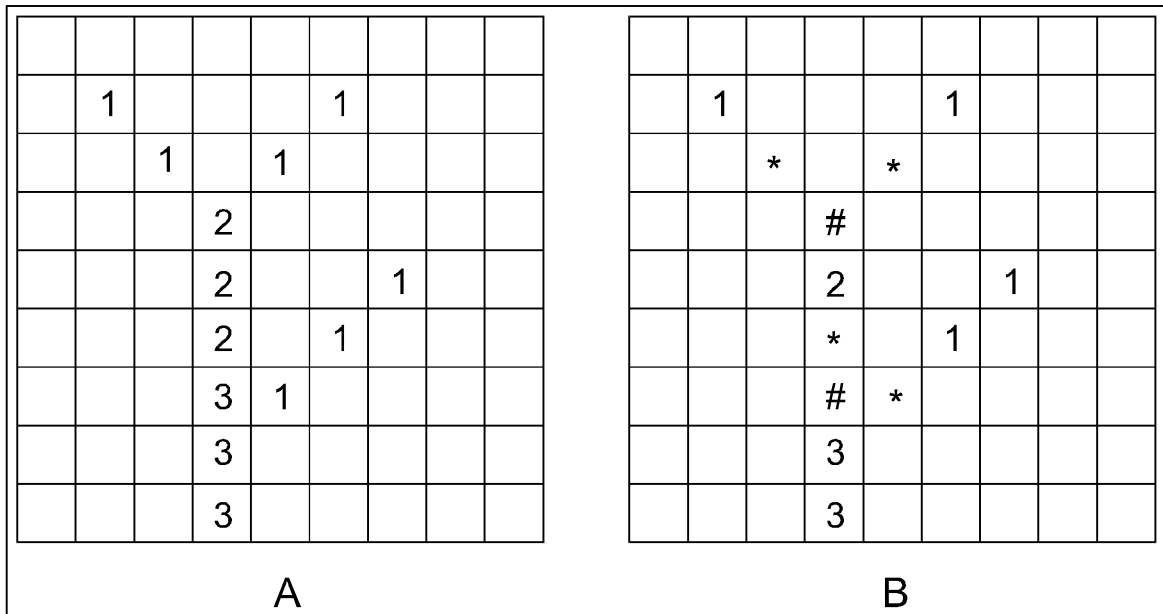


Figure 5.3.6. (A) Raster data structure of the drainage network of Figure 5.3.4. (The cell values represent the Shreve stream order). (B) Representation of the drainage network element junctions (#) and the cells that are considered as outlets to compute each elementary catchment (*).

The correct outlet sources must be depicted before the elementary catchments are computed. A method to do so has been developed, using the capabilities of the Grid module of Arcinfo. It is based on the identification of the upstream outlet cells that are adjacent to the junction cells of the drainage network (Figure 5.3.6). These cells are also the outlet cells of the elementary catchments. These cells must fulfil the following criteria (Figure 5.3.7): 1) The processing cell is a cell of the drainage network, 2) The neighbouring cell is of a higher Shreve order, 3) The same neighbouring cell is a junction cell of the drainage network. These criteria are easily programmed in a cell by cell search using a 3x3 grid filter within a DOCELL operation or ArcInfo's Grid module. The neighbourhood cells used in this routine are shown in the notation given in Figure 5.3.8.

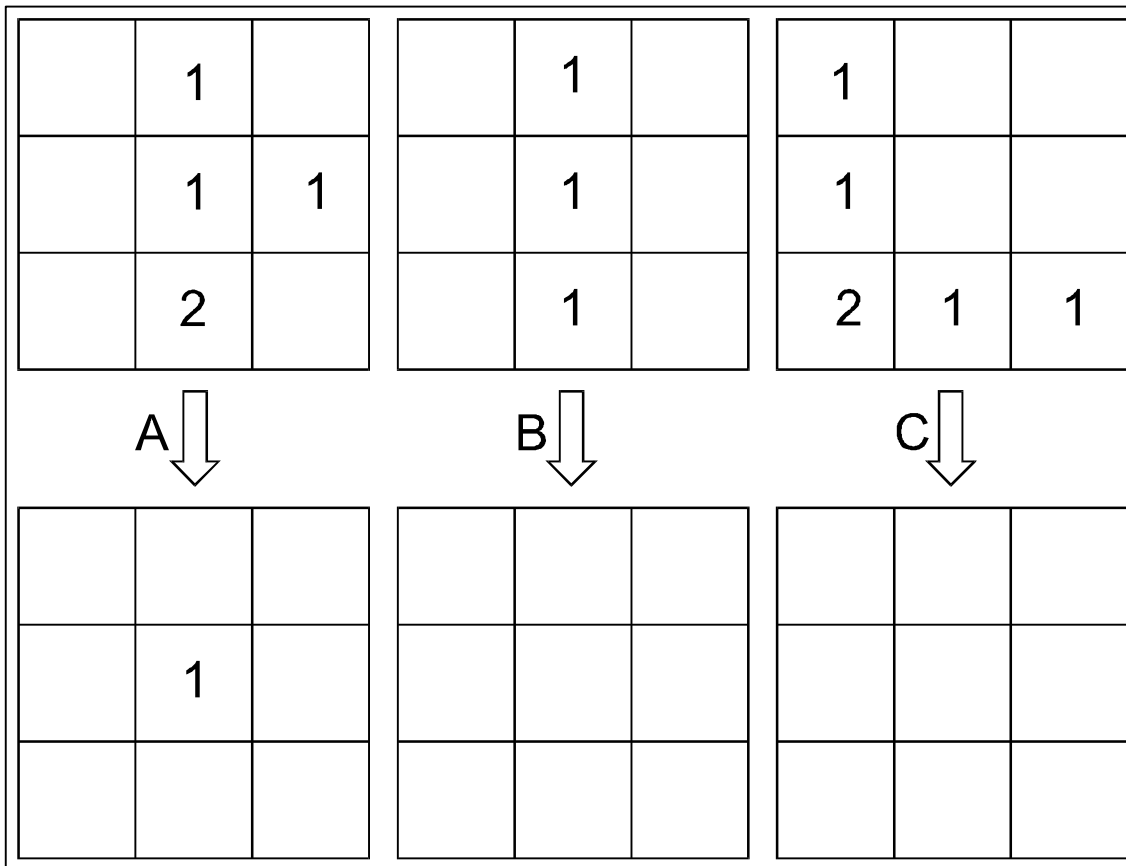


Figure 5.3.7. Examples of criteria that the processing cell (central cell in the 3 x 3 window) must fulfil to be labeled as outlet cell: (A) The processing cell fulfil the required criteria; (B) The processing cell is a cell of the drainage network but no neighboring cell is of a higher Shreve order; (C) The processing cell is not a cell of the drainage network.

The DOCELL process needs two input grids. A drainage network grid ordered according to Shreve and a grid representing the junctions of the drainage network. The output grid is made using the previously described criteria.

Very important in this approach, is the necessity to give each outlet cell its own unique value. This value is used to identify each elementary catchment at the end of the routine. A scalar is used in the DOCELL loop to realise this result. The value one is added each time to the scalar when a criteria is true. The scalar value is thereafter saved in the selected cell. Finally, the elementary catchments are computed by means of the WATERSHED function. This function uses the flow direction grid and the grid with the uniquely defined outlets.

| | | |
|---------|--------|--------|
| (-1,-1) | (0,-1) | (1,-1) |
| (-1,0) | (0,0) | (1,0) |
| (-1,1) | (0,1) | (1,1) |

Figure 5.3.8. Arcinfo-Grid neighbourhood notation: cell position within a 3 x 3 window.

5.3.2.3. Program to delineate the drainage network and the elementary catchments from a DEM

A program that applies the proposed methodology, to automatically delineate the drainage network and the elementary catchments of an area from a DEM, was written in Arc Macro Language (AML). This program operates in the Arc, Arcedit and Grid environments of ArcInfo. The structure of the program is represented in the data flow diagram of Figure 5.3.9.

The program has the following four main blocks:

1. Pre-calculation Block
2. Obtaining the drainage network
3. Interactive editing of the drainage network
4. Determining the outlets and computing the elementary catchments

The pre-calculation block requires a sinkless DEM. The sinkless DEM can have any grid cell resolution. All further derived grids will receive the resolution as the input DEM. The required flow direction and flow accumulation grids are computed in this block. The flow accumulation grid can be adapted to fulfil different lithological characteristics, since the drainage pattern of an area is related to the erodibility of the materials (Chorley *et al.* 1984).

A preliminary threshold area value is another input. This can be established according to a user criterion or according to a threshold area function. The program gives the option to enter a user defined flow accumulation value or a value coming from a function concerning the topographical variables of interest for an area (i.e. mean slope).

The next program block is to obtain the preliminary drainage network using the selected threshold area value by a simple reclassification of the flow accumulation grid. Thereafter, the Shreve ordering function is applied to the computed drainage network. These order values are used in the DOCELL process (Table 5.3.1).

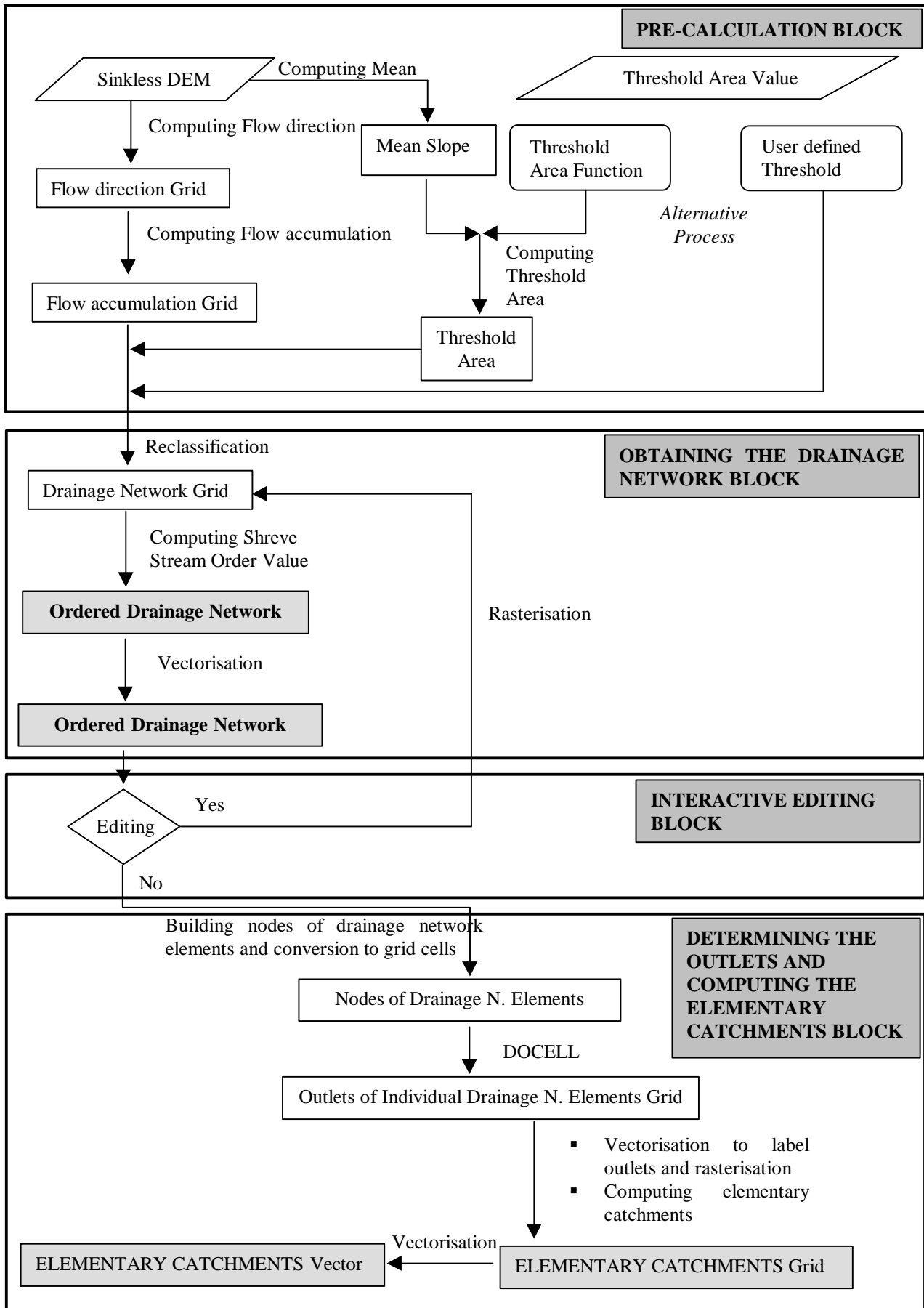


Figure 5.3.9. Flow diagram of the program to obtain the drainage networks and the elementary catchments.

Table 5.3.1. DOCELL process to find the outlets of the elementary catchments as implemented in Arc Macro Language.

```

/* DOCELL PROCESS
/* outgrid = grid with subcatchment outlets
&if [exists %outgrid% -grid] &then
    kill %outgrid%

/* Grids used in the following DOCELL loop
/* % .indem%stord = streamnet grid with Shreve order (input)
/* % .indem%grdpoint = streamnet grid with function points (input)
/* %outgrid% = grid with subcatchment outlets (output); each cell has a unique value.

/* remove scalar count and give it the starting value 1.
removescalar count
count = scalar(0)
DOCELL
&type "DOCELL ACTIVE: 8 NEIGHBOURS"
    IF (% .indem%stord(0,0) > 0 & % .indem%grdpoint(-1,-1) > 0 & ~
        % .indem%stord(-1,-1) > % .indem%stord(0,0)) {
        count += 1
        %outgrid% = count
    }
    IF (% .indem%stord(0,0) > 0 & % .indem%grdpoint(0,-1) > 0 & ~
        % .indem%stord(0,-1) > % .indem%stord(0,0)) {
        count += 1
        %outgrid% = count
    }
...
{Repeated for the rest of neighbour positions}
...
END

/* COMPUTE ELEMENTARY CATCHMENTS
kill % .indem%watshed
% .indem%watshed = watershed(% .indem%flowdir, %outgrid% )

```

During the experiments, it was always necessary to edit the computed drainage network. This necessity arises, among other reasons, due to errors in height that are always found in a DEM. However, the better the threshold value is chosen, the less time need to be spent on editing the drainage network.

Typical errors that are found in the computed drainage network are:

- non-connected arcs to the drainage network
- parallel drainage lines in meandering zones
- very short drainage lines that are of no significance
- missing drainage network elements when comparing the computed drainage network with a photo-interpretation check.

To edit these errors, an optional vector editing menu was implemented. The editing of the

network is not compulsory. The user can decide to whether to use this facility or not. Once the drainage network passes the editing phase, the final computation to derive the elementary catchments is executed. In this part, both the junction points of the drainage network and the drainage network itself are rasterized to create the necessary input.

Three datasets emerge from this program:

1. A grid dataset with the elementary catchments (uniquely identified) of a drainage basin.
2. A polygon coverage dataset of the same elementary catchments.
3. A line coverage containing the drainage network elements with the Shreve order attribute.

Once developed, the program was applied to compute the best fit drainage network and the elementary catchments in one representative catchment of each test area (Figure 5.3.5). The Rierusa drainage basin, with an extension of 24.3 km², was selected as representative of the Piera-Masquefa area, and the Romaní-Bribons basin, with an extension of 29.6 km², as representative of the Pla del Penedès. The threshold area value for each basin was computed from the respective topographical-variable dependent functions, as proposed in paragraph 2.1.

5.3.3. Results

5.3.3.1. *Establishing the threshold area value to derive the best fit drainage network pattern*

Very different drainage network representations are produced by using different threshold area values. As an example, the Figure 5.3.10 shows this situation after applying different threshold area values to the flow accumulation grid of the Rierusa basin, in the Piera-Masquefa test area. This figure also shows the drainage network as derived by means of aerial photo-interpretation.

The application of the proposed methodology, to obtain the best fit drainage network for areas with different relief types, produced the results that are summarised in Table 5.3.2. This table shows the threshold area values that produced the most faithfully representation of the drainage networks of each or the 20 sample catchments located in the two test areas. The values of mean slope degree, relief amplitude and relative relief for each sample catchment are also indicated.

These data was used as input in a linear regression analysis to find out any relationship between the threshold area and the considered topographical variables. Table 5.3.3 summarised the obtained results.

Although some researchers affirm that no experimental evidence of a relationship between slope and threshold area exists (Da Ros and Borga 1997, Gandolfi and Bischetti 1997), in our study we found a negative correlation between the mean slope of a catchment and the threshold area value that gives the best fit drainage network. This is confirmed for the two test areas that were considered in the present research.

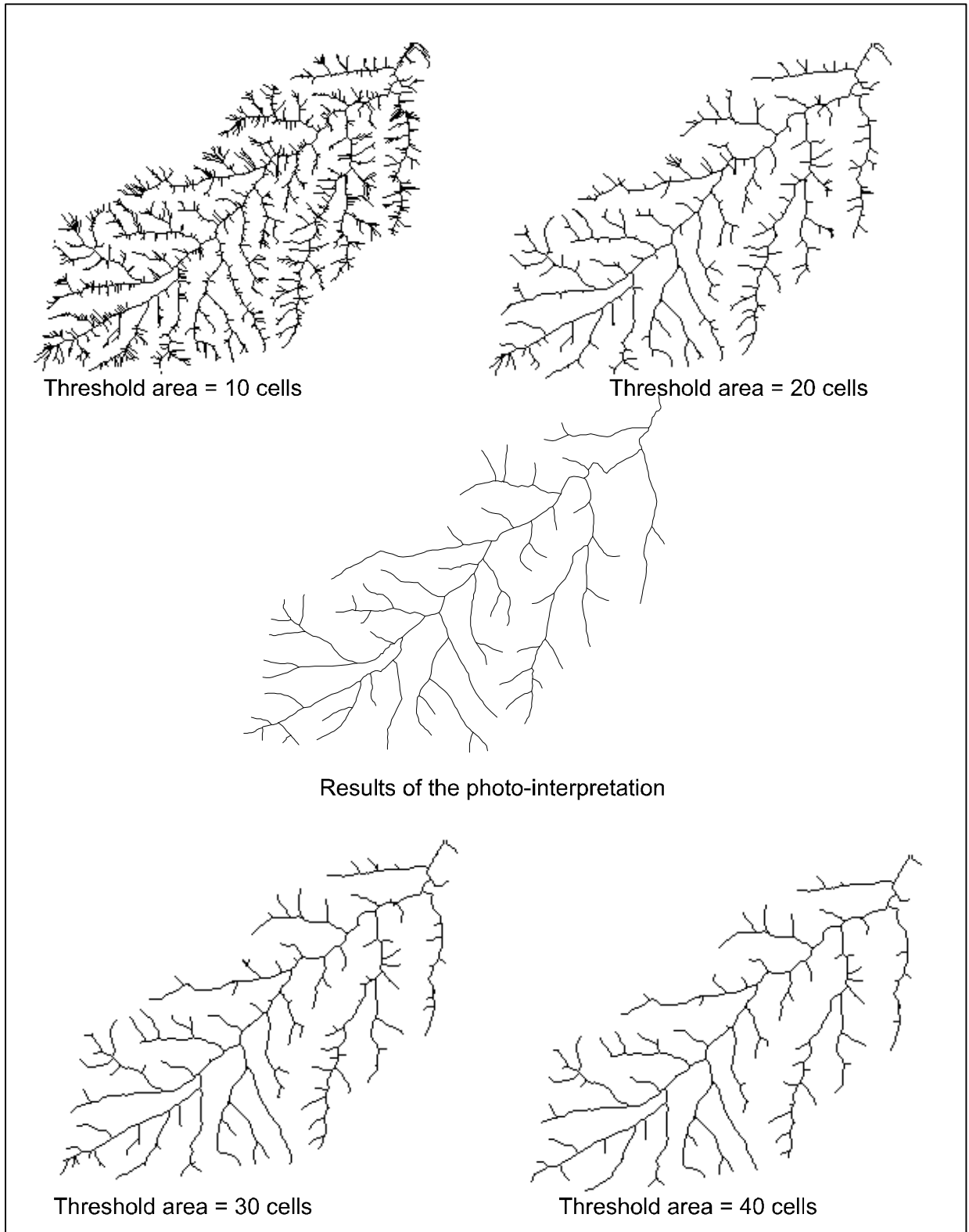


Figure 5.3.10. Resulting drainage networks (Rierusa basin) after the application of different threshold area values and comparison with drainage network as result of the photo-interpretation.

Table 5.3.2. Topographical variables and threshold area for the sample catchments in the two test areas located in the Alt Penedès – Anoia region (Catalonia, NE Spain).

| Test Area | Sample catchment | Area (m ²) | Mean slope (%) | Relief amplitude (m) | Relative relief (m ha ⁻¹) | Threshold area (number of cells) |
|----------------------------|------------------|------------------------|----------------|----------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| North: Piera – Masquefa | 1 | 2610625 | 16.5 | 151 | 0.58 | 40 |
| | 2 | 1240000 | 15.6 | 123 | 0.99 | 40 |
| | 3 | 1303125 | 15.4 | 116 | 0.89 | 35 |
| | 4 | 2275000 | 19.4 | 172 | 0.76 | 35 |
| | 5 | 1105625 | 14.8 | 118 | 1.07 | 40 |
| | 6 | 1402500 | 17.7 | 125 | 0.89 | 40 |
| | 7 | 1494375 | 14.1 | 133 | 0.89 | 45 |
| | 8 | 1359375 | 10.7 | 108 | 0.79 | 65 |
| | 9 | 1235000 | 21.4 | 137 | 1.11 | 35 |
| | 10 | 1551250 | 18.8 | 125 | 0.81 | 35 |
| South: Pla del Penedès | 1 | 2756250 | 19.1 | 235 | 0.85 | 45 |
| | 2 | 1550625 | 13.7 | 157 | 1.01 | 30 |
| | 3 | 1545625 | 9.0 | 116 | 0.75 | 75 |
| | 4 | 1589375 | 6.2 | 94 | 0.59 | 95 |
| | 5 | 1467500 | 14.8 | 125 | 0.85 | 35 |
| | 6 | 2815625 | 15.0 | 177 | 0.63 | 50 |
| | 7 | 2258750 | 16.4 | 278 | 1.23 | 35 |
| | 8 | 1641875 | 8.3 | 134 | 0.82 | 60 |
| | 9 | 1190000 | 8.2 | 82 | 0.69 | 65 |
| | 10 | 968750 | 10.8 | 140 | 1.45 | 55 |

Table 5.3.3. Results of the linear regression analysis between the threshold area values and topographical variables for the sample catchments.

| Test area | Independent variables | Linear regression equation $A_t = \text{Threshold area (number of cells)}$ | Coefficients |
|----------------------------|--|---|---|
| North: Piera – Masquefa | Mean slope (%) | [1] $A_t = 80.69 - 2.41 S$ | $r^2 = 0.657$ $F = 15.3^{**}$; $df = 8$ |
| | Relief amplitude (m) | [2] $A_t = 69.51 - 0.22 RA$ | $r^2 = 0.204$ $F = 2.0$; $df = 8$ |
| | Relative relief (m ha ⁻¹) | [3] $A_t = 50.75 - 11.11 RR$ | $r^2 = 0.036$ $F = 0.3$; $df = 8$ |
| | Mean slope (%) Relief amplitude (m) | [4] $A_t = 79.49 - 2.47 S + 0.01 RA$ | $r^2 = 0.658$ $F = 6.7^*$; $df = 7$ |
| South: Pla del Penedès | Mean slope (%) | [5] $A_t = 101.17 - 3.84 S$ | $r^2 = 0.648$ $F = 14.8^{**}$; $df = 8$ |
| | Relief amplitude (m) | [6] $A_t = 85.50 - 0.20 RA$ | $r^2 = 0.377$ $F = 0.3$; $df = 8$ |
| | Relative relief (m ha ⁻¹) | [7] $A_t = 40.49 + 0.57 RR$ | $r^2 = 0.003$ $F = 2.6$; $df = 8$ |
| | Mean slope (%) Relief amplitude (m) | [8] $A_t = 100.7 - 4.43 S + 0.05 RA$ | $r^2 = 0.656$ $F = 6.7^*$ |

** Significant relationship ($P < 0.01$); * Significant relationship ($P < 0.05$)

Other topographical variables, as the relief amplitude and the relative relief, presented a very low r^2 (coefficient of determination) and were rejected as predictors of the threshold area.

The multiple linear regression, with mean slope and relief amplitude as independent variables, did not improve the correlation between the threshold area and the mean slope. Even, the significance level of rejecting the null hypothesis, concerning the existence of a relationship between the dependent and the independent variables, was lower in the case of the multiple linear regression for the two test areas, (see F values).

In the present study, the equations 1 and 5 (Table 5.3.3) were selected to obtain the best fit drainage network of the Piera-Masquefa and Pla del Penedès test areas respectively. These equations were implemented in the developed program to compute the drainage network and the correspondent elementary catchments.

More data would be necessary to find a better correlation between the mean slope of a drainage basin and a threshold area to compute the drainage network. In a large area, with different relief types, it is few probable the same threshold area produces the best fit drainage network for the different relief type areas. Therefore, the proposed method should be applied to landscape units where a repetition of the a similar relief pattern is observed.

5.3.3.2. Automatic obtention of the drainage networks and elementary catchments

The implemented program (paragraph 2.3) was applied to compute the drainage network and the elementary catchments of two representative drainage basins located in the considered test areas (Figure 5.3.5). The threshold area for each drainage basin was derived by means of the mean slope functions. The threshold area for the Rierusa basin, with an average slope of 17.6%, was computed from equation 1 (Table 5.3.3), yielding a value of 37.2 cells (rounded to 38 cells). The threshold area for the Romaní-Bribons basin, with an average slope of 10.9%, was computed from equation 5 (Table 5.3.3), yielding a value of 62.7 cells (rounded to 63 cells). The drainage network coverages derived from those values were edited. In this case it was found that the dangle arcs less than 225 m (5 cells) could be removed before computing the elementary catchments. Figure 5.3.11 shows the elementary catchments computed from the DEMs for the Rierusa and Romani-Bribons basins, in test area in the Alt Penedès - Anoia (NE Spain).

5.3.4. Conclusions

The present paper discussed a method that tries to reproduce, in an automated way (using DEM data and GIS capabilities), the traditional manner of delineating drainage networks and catchments.

When using DEM data, a drainage network representation of a given area can be achieved by a simple reclassification of a flow accumulation grid. Then, in comparison with the whole process of aerial photo-interpretation plus hand digitizing of the drainage network of the same area, the first is very much faster. However, is the that process (reclassification of a flow accumulation grid) more reliable than the manual oriented method ?

The present research showed that very different drainage network representations can be produced by using different threshold area values. Comparisons between those representations and the aerial photo-interpretation results were needed to establish, for each

test area, the most reliable threshold area, according to the purposes of the user. This training stage to establish the threshold area function slows down the automatic process, but it is needed to obtain the most faithfully drainage network representation of an area. However, once the threshold area function is computed it can be applied to larger areas in order to obtain the drainage network and to automatically compute the elementary catchments of the drainage network elements.

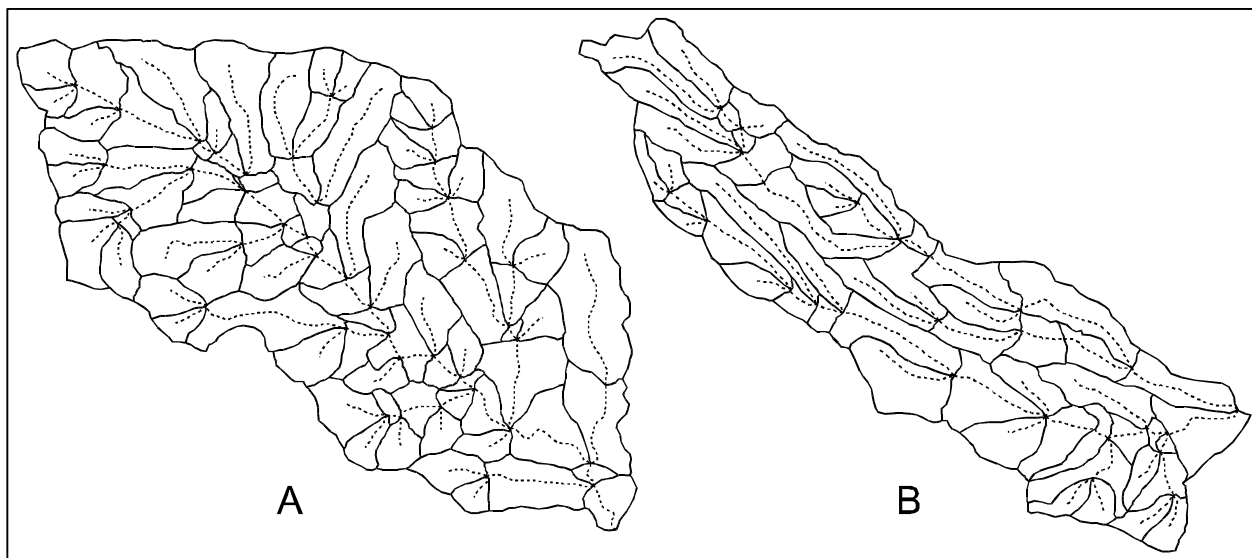


Figure 5.3.11. Elementary catchments of the Rierusa (A) and Romani-Bribons (B) drainage basins according to the proposed methodology. (The drainage network has been superimposed).

Regarding the automation of the process, two main methodological aspects were addressed. A start is made in finding a function to determine the threshold area needed to derive the best fit drainage network pattern from a given DEM. Different drainage networks for different sample catchments within the test areas, derived from varying the threshold value, were compared with the drainage networks coming from aerial photo-interpretation. A relationship between the average slope of the sample catchments and the best fit threshold area value was confirmed. Different relationships (linear regression equations) were computed for the two different test areas, that show distinct relief characteristics. It reveals the convenience of using different threshold area values in landscape units with different relief types, in order to compute the most faithfully drainage network of each area. Other morphometric characteristics as relief amplitude or relative relief (relief amplitude/area of the catchment) were looked at but they did not improve the correlation, even in a multiple regression analysis.

The second aspect addressed is a method to derive a spatial dataset of individual elementary catchments from drainage network elements. This method overcomes the problem of using drainage element nodes or junctions as source points in the watershed function. This method was easily implemented in the grid environment of Arcinfo using a cell-by-cell operation.

The final aspect addressed is the implementation of the proposed methodology in a program, which serves as a base to derive drainage networks and elementary catchments from a DEM. The program allows the user to determine the threshold area value, either setting a value according to the user criteria or by means of a threshold value function. Also, it allows the user to edit the preliminary drainage network before computing the elementary catchments. In the present study, the threshold area function was specific for each test area, using a 45 m resolution DEM. Therefore, the result of the threshold area function is not directly applicable to any area or to DEMs with a different resolution without further studies. This is one of the main topics for future research that were identified: the variability of this correlation with DEMs of different resolution levels. Another main topic is the study of the correlation between other terrain characteristics and the flow accumulation threshold value, in order to dispose of better threshold area functions to derive the best fit drainage networks.

The automatic delineation of elementary catchments is a big step forward in several types of studies and projects related to watershed management, hydrology, erosion, etc.; especially at semi-detailed or reconnaissance level. At a higher study detailed level, other management units like hillslopes or plots become more relevant. The elementary catchments derived are nested in the aggregation hierarchy structure, as proposed by Martínez-Casasnovas (1994), that allows the automatic generalization of this terrain information.

5.3.5. References

- Böhme, R.** 1988. Topographic cartography. In: RW Anson (ed), Basic cartography, pp 1-21. International Cartographic Association and Elsevier, London and New York.
- Chorley, R J.** 1969. The drainage basin as the fundamental geomorphic unit. In: R J Chorley (ed), Water, Earth and Man, Chapter 2, pp 77-99. Methuen & CO. Ltd. London.
- Chorley, R J, S A Schumm and D E Sugden.** 1984. Geomorphology. Methuen. London.
- Da Ros, D and M Borga.** 1997. Use of digital elevation model data for the derivation of the geomorphological instantaneous unit hydrograph. Hydrological processes, 11, pp 13-33.
- Dunne, T and L B Leopold.** 1978. Water in environmental planning. W.H. Feeman, Co. New York.
- Felicísimo, A.** 1994. Modelos digitales de terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias medioambientales. Pentalfa ediciones. Oviedo.
- Gandolfi, C and G B Bischetti.** 1997. Influence of the drainage network identification method on geomorphological properties and hydrological response. Hydrological Processes, 11, pp 353-375.
- Ichoku, C, A Kamieli, A Meisels and J Chorowicz.** 1996. Detection of drainage channels networks on digital satellite images. International Journal of Remote Sensing, 17, 9, pp 1659-1678.
- Jenson, S K and J O Domingue.** 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 54, pp 1593-1600.
- Klinghammer, I and E Loránd.** 1991. Relief representation. In: RW Anson and FJ Ormeling (eds), Basic cartography. Exercise manual, pp 161-176. International Cartographic Association and Elsevier, London and New York.
- Marsh, W M.** 1991. Landscape planning: Environmental applications. J.Wiley & Sons, Inc. Toronto.
- Martínez-Casasnovas, J A.** 1994. Hydrographic information abstraction for erosion modelling at regional level. A database perspective in a GIS environment. Msc Thesis (unpublished), Wageningen Agricultural University, Wageningen.
- Martínez-Casasnovas, J A and M Molenaar.** 1995. Aggregation hierarchies for multiple scale representations of hydrographic networks in GIS. Proceedings of the 17th International Cartographic Conference, Vol. 1, pp 358-362.
- Meijerink, A M J.** 1988. Data acquisition and data capture through Terrain Mapping Units. ITC Journal, 1988-1, pp 23-44.
- Molenaar, M and J A Martínez-Casasnovas.** 1996. A formalism for the structural description of vector maps, and its use for multi-scale representations: a hydrographic example. Cartographica, 33, 1, pp 55-63.

- Moore, I D, R B Grayson and A R Landson.** 1991. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications. *Hydrological Processes*, 5, pp 3-30.
- Mulders, MA.** 1987. Remote sensing in soil science. Elsevier, Amsterdam.
- O'Callaghan, J F and D M Mark.** 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 28, pp 323-344.
- Richardson, D.** 1993. Automatic spatial and thematic generalization using a context transformation model. (Doctoral dissertation, Wageningen Agricultural University), R&B Publications, Ottawa, Canada.
- Rieger, W.** 1993. Hydrological terrain features derived from a pyramid raster structure. In: K Kovar and H P Natchnebel (eds), *Application of Geographical Information Systems in hydrology and water resources management*, IAHS Publication num. 211, Oxfordshire, pp. 201-210.
- Robinson, A; R Sale and J Morrison.** 1978. *Elements of cartography*. John Wiley and Sons, New York.
- Shreve, R L.** 1966. Statistical law of stream number. *Journal of Geology*, 74, pp 17-37.
- Strahler, A N.** 1956. The nature of induced erosion and aggradation. In: W L Thomas et al. (eds.), *Man's role in changing the face of the earth*. pp 621-638.
- Strahler, A N.** 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions of the American Geophysical Union*, 8(6), pp 913-920.
- Tarboton, D G, R L Bras and L Rodriguez-Iturbe.** 1991. On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrological Processes*, 5, pp 81-100.
- Tribe, A.** 1992. Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: a review and a new method. *Journal of Hydrology*, 139, pp 263-293.
- Van Zuidam, RA.** 1986. *Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping*. Smits Publishers, The Hague.

5.4. Prediction of existing gully erosion in vineyard parcels of the NE Spain: A logistic modelling approach.

A. Meyer (1) and J. A. Martínez-Casasnovas (2). Prediction of existing gully erosion in vineyard parcels of the NE Spain: A logistic modelling approach. *Soil Technology* (submitted August 1998).

(1) *Institute of Physical Geography and Landscape Ecology, University of Hannover (Germany).*

(2) *Department of Environment and Soil Science, University of Lleida (Spain).*

Prediction of existing gully erosion in vineyard parcels of the NE Spain: A logistic modelling approach

Abstract

This paper presents a study of determining factors and a method to predict the existence of gully erosion in vineyard parcels. The Alt Penedès-Anoia region (Catalonia, NE Spain), mainly dedicated to the cropping of vineyards for high quality wine production, was selected as case study area. Single factors related to the existence of gully erosion were determined by means of statistical tests (Student-t test and Chi-Square). The existence of gully erosion was predicted by means of a multivariate procedure. A stepwise selection of variables (relief, soil, land use/management characteristics) was performed. It allowed the identification of the factors that present a significant relationship with the existence of gully erosion. The selected factors, slope degree and planar slope form, were considered as independent variables in a logistic regression of binary response. The model computes the probability that gullies exist in given vineyard parcels, and it can be implemented in a raster-based Geographical Information System (GIS). The assessment of the model in 52 parcels, different from the training data set, yielded an overall accuracy of 84,6%. The predictive model can be applied for areas with similar conditions but the modelling approach can be applied in other different areas.

Keywords: Gully erosion, GIS, Logistic regression.

5.4.1. Introduction

5.4.1.1. Gully erosion: importance and modelling methods

Gully erosion is a serious problem specifically in certain areas, because of climate, lithology, soils, relief characteristics and land use. The Alt Penedès – Anoia (Catalonia, NE Spain), a region located in the Mediterranean basin, is a clear example. Porta *et al.* (1994) and Martínez-Casasnovas (1998), using aerial photointerpretation, gave respectively rates of 20% and 31.9% of total surface affected by large gullies in some areas of that region. That says about the importance and repercussion of the problem in the agricultural systems: reduction of parcels size, soil losses, need of costly control practices, damage of infrastructures, etc. Other important implications are dissection of landscape and environmental pollution.

Several are the factors responsible for the existence of serious problems of gully erosion in some regions of the Mediterranean basin. On one hand, the lithology of parent materials (marls in many areas) and the semi-arid climate, with hot and dry summers that frequently coincide or are followed by high intensity rainfalls (Ramos and Porta 1993 and 1994, Hill 1993, Usón 1998). Also during the last centuries, human activities have substantially transformed natural mixed forested areas into agricultural land. The dominant crops (cereals, vineyards, olive and almond trees) only cover the soil during specific periods or with a partial coverage, making soil unprotected against high intensity rainfalls. Moreover, from the advent of mechanisation, parcels have been transformed to adapt them to modern

machinery. This has involved elimination of traditional soil conservation measures, with a negative repercussion on soil erosion.

Gully erosion is usually a regional problem that has to be controlled from the parcel-level to the regional level. Control at regional level is difficult to achieve since the affected region usually has not a unique clear authority, or because huge investments should be made for a subject that is not considered as a priority task. Control at parcel level is more feasible, but in most cases farmers do not see the necessity of implementing control measures. Ephemeral gullies that grow in parcels are routinely removed by conventional tillage or filled with soil materials. Gullies are usually found in natural drainage ways within the parcels (Laflen *et al.* 1986), where runoff is concentrated (Vandaele *et al.* 1996, Poesen 1989, Poesen and Govers 1990). In comparison with rill erosion, ephemeral gullies usually occur at the same place after each high intensity rainfall, and may lead to typical gullies.

Identification at parcel level of areas with high probability of existence of gully erosion constitutes a core element for conservation planning. This information will be useful for farmers as well as for regional planners to know location of risk areas and the level of the risk.

Gully erosion processes are less well understood than other erosion processes (Heede 1979, Imeson and Kwaad 1980, Zinck 1997). Most of the research has been addressed to analyse gully morphology and the stages of gully development, as a first step in evaluating gully processes and assessing potential for gully erosion (Ireland *et al.* 1939, Heede 1970, Imeson and Kwaad 1980, Crouch and Blong 1989). Gully erosion modelling has focused more on development of qualitative and empiric-statistical models than in the formulation of physically-based models (Seginer 1966, Thompson 1964, Williams and Morgan 1976, Stocking 1980, Donker and Damen 1984). Most of them are multivariate regression equations based on factors which have proved their correlation with existing gully erosion. These equations either predict rates of advance of gully heads for established gullies, or give threshold values, above which development of gullies can be expected.

The present paper tries to be a contribution to both: a) the analysis of terrain and land use/management factors determining the existence of gully erosion, particularly in the Alt Penedès – Anoia region, and b) the prediction of existing gully erosion at parcel level in vineyard parcels. First, the correlation of existing gully erosion with single terrain and land use/management factors is determined by means of statistical analysis. Second, a method to predict the existence of gully erosion at parcel level is presented. The last is assessed in terms of the probability gullies exists in a parcel, depending on related terrain and land use/management variables. The probability equation is based on a logistic regression of binary response, for which a large number of variables have been evaluated according to a multivariate approach.

5.4.1.2. The study area

The Alt Penedès-Anoia region (Catalonia, NE Spain) is an agricultural area traditionally dedicated to production of high quality wines and *cavas* (sparkling wine produced by means of the Champagne method) (Figure 5.4.1).

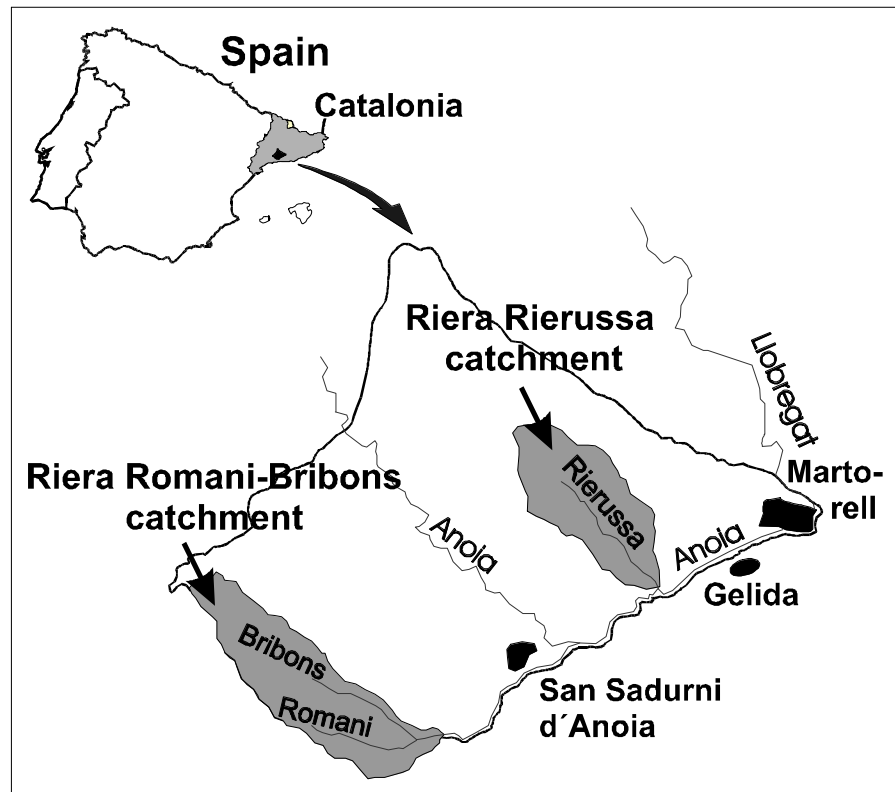


Figure 5.4.1. Location of the study area.

The area is located about 30-40 km south west of Barcelona, between the Sierra Prelitoral mountains and the Anoia and Llobregat rivers. This area is part of the Penedès Tertiary Depression. This include calcilutites (marls) with ocasional sandstones and conglomerates. In the central part of the depression, these conglomerates are consolidated, however the conglomerates in the northern part of the study area are unconsolidated and no residual landforms are found in this area.

The area lies within the temperate to maritime Mediterranean climate. The mean annual rainfall ranges from 471 to 670 mm (Porta *et al.* 1994). Its distribution is irregular, with high intensity rainstorms during autumn, after the dry season, with high erosive potential (Ramos and Porta 1993). Soils are highly calcareous. According to Soil Taxonomy (SSS 1996) they are classified as *Xerorthents typics*, *Xerochrepts calcixerollic*, *Xerochrepts petrocalcic* and *Xerochrepts fluventics*. Other categories as *Palaxeralfs* and *Haploxeralfs* were also described and mapped in this area (Martínez-Casasnovas 1998). These have been truncated by hydric erosion and, at present, they are only relicts.

The main land use is vineyards. Other important uses are winter cereals, that alternate with vineyards. Natural vegetation and forest is confined at mountains, walls of large gully and abandoned agricultural parcels (very sloping areas of small parcels).

One of the main characteristics of the area is the dissection of the landscape by a dense and deep network of gullies. Inter-gully areas are usually undulating to rolling, with complex slopes. Large gullies are characterised by vertical sidewalls and are 10 or more meters deep in many places. The development of the gully system has been favoured by the cropping of vineyards. This culture strongly generates overland flow during high intensity precipitation events. Surplus runoff is usually concentrated in hillside ditches (called “rases”), that flow either into main drainage channels or directly into gullies. This favours formation of gullies at ditches or drainage outlet points and in this manner the gully network enlarges linearly. Then gullies grow by deepening in the unconsolidated Tertiary deposits. Mass movements on sidewalls produce parallel widening of gullies.

Within the parcels, ephemeral gullies are repetitively smoothed over by tillage, but the causes of these temporary appearances are not fought against. Continuous erosion removes part of the nutrient-rich top soil and could rapidly lead to diminishing the yield. Also other damages as the dissection of parcels and the difficulty for the traffic of machinery are produced (Figure 5.4.2).



Figure 5.4.2. Development of gullies in vineyard parcels and damages.

The agricultural system suffered a substantial transformation since the advent of mechanisation in the 1950 decade. It has led to an ever increasing land degradation. Huge soil movements, needed to achieve parcels with longer vine rows and lower slope degrees, soil compaction caused by heavy machinery and the lack of appropriate conservation measures, have led to reactivate erosion processes.

In the long run, one can say that the sustainability of the present agricultural land uses and soils are threatened by erosion, and operational techniques to identify priority areas where to implement control measures are urgently needed.

5.4.2. Methods and materials

The research was carried out in two sample catchments of the Alt Penedès-Anoia region. Those are the Rierussa and Romani-Bribons catchments, with a size of about 25 km² each (Figure 5.4.1). They were selected because of their differences in landscape characteristics (Table 5.4.1).

Table 5.4.1. Main relief and lithologic characteristics of the sample catchments.

| | |
|---|---|
| <p>Rierusa catchment (High dissected valley – glacis landscape unit)</p> | <p>Relief: Typically complex slopes, rolling to hilly terrain (5-20% slope degree). Slopes are abruptly incised by deep gullies. Mean relieve amplitude 13-20 m (out of gullies). Drainage density 3.4 km km⁻². Geoforms: Rounded crests, gentle complex slopes (5-10% s. degree), sloping complex slopes (10-15% s. Degree), moderate steepy slopes (15-25% s. degree). Lithology: Tertiary marls, sandy marls and conglomerates (unconsolidated).</p> |
| <p>Romaní – Bribons catchment (Low dissected valley – glacis landscape unit)</p> | <p>Relief: Typically simple linear or concave slopes, gentle or moderate slope degree (1-10%). Relieve amplitude: between 6 m in rounded crests and 19 m in moderate degree slopes. Drainage density 3.2 km km⁻². Geoforms: Rounded crests and sloping concave slopes (5-10% s. Degree), glacis and gentle slopes (1-5% s. Degree), moderate sloping to steepy slopes (5-20% s. degree), steepy and steepy slopes (20-45% s. degree), infilled valley bottoms. Lityhology: Tertiary marls and sandy marls (unconsolidated).</p> |

In those catchments, 40 vineyard parcels (20 with and 20 without evidences of gully erosion: ephemeral and small typical gullies 0.3 - 1 m deep and 0.5 - 1.5 m wide) were sampled. Those parcels were representative of the most frequent geoforms of the catchments as well as the typical vineyard management practices (for example orientation of the vine rows with respect to the maxim slope direction or the existence of levelling).

The elementary or basic spatial unit (b.s.u.) for data collection was the minimum support area required to drain to a point for water to flow in a concentrated manner and for a channel to form (Rieger 1993). Its boundary may differ from the parcel one.

For each sampling unit, a set of 23 potential factors, related to the development of gullies in vineyard parcels were sampled by means of field work, laboratory analysis and spatial data analysis by means of Geographic Information Systems (GIS). Table 5.4.2 summarises the sampled factors and the method of measurement or determination.

Table 5.4.2. Relief, soil, and land use/management factors and sampling methods.

| Factor | Definition | Method of measurement |
|--------------------------------------|--|---|
| Relief position | Position of the b.s.u. on the slope (from the water divide to the foot of the slope), (°) | Field observations |
| Slope degree | Mean of the slope degree of the different slope segments of the b.s.u. | In the field: Measured with the clinometer on slope segments not larger than 30m In laboratory: DEM analysis (Function Curvature, ArcInfo-Grid™) |
| Slope contour form | Planform curvature of the b.s.u. | In the field: visual observation In laboratory: DEM analysis (Function Curvature, ArcInfo-Grid™) |
| Slope profile form | Profile curvature of the b.s.u. | In the field: visual observation In laboratory: DEM analysis (Function Curvature, ArcInfo-Grid™) |
| Exposition | Direction of the maximum slope | In the field: Magnetic needle In laboratory: DEM analysis (Function Curvature, ArcInfo-Grid™) |
| Area | Area of the b.s.u., (m ²) | In laboratory: calculation by means of GIS |
| Length | Maximum length of the b.s.u., (m) | Field measurements |
| Variance of the slope degree | Variance of the slope degree within the b.s.u. | Automatic calculation by means of DEM analysis in raster based GIS |
| Relief amplitude | Maximum altitude difference within the b.s.u. | In laboratory: DEM analysis by means of GIS |
| Distance outlet b.s.u. – large gully | Distance between the outlet of the water flow of the b.s.u. and the nearest large gully, (m) | Measurement in field |
| Type of vineyard plantation | Traditional/Modern plantation | Field observations |
| Vine rows pattern | Orientation of the vine rows with respect to the maxim slope | Field observations |
| Conservation practices | Existence of conservation practices and type | Field observations |
| Levelling measures | Existence or non-existence of levelling measures | Determination in the field and consultation with the owner of the farm |
| Drainage channel | Existence drainage channels | Determination in the field |
| Soil texture | Soil texture of the Ap horizon | Laboratory analysis: sedimentation and sieve analysis of the samples. |
| Soil structure | Structure of the Ap horizon | Determination in the field |
| Organic matter content | Organic matter content of the Ap-Horizon, (m) | Laboratory analysis: Method: Walkley – Black |
| Soil surface crusting | Existence of crusts on the soil surface | Field observations |
| Soil depth | Soil depth up to a limiting layer | Field observations by drilling with an auger hole |
| Soil class | | Soil Taxonomy (SSS 1975 and 1996) |
| Stoniness of the soil surface | Cover of the soil surface by stones, (%) | Determination in the field by means of key legends |
| Lithology | Type of parent material | Determination in the field by means of drilling with an auger hole |

GIS was used for data acquisition and analysis. The vector-raster GIS software ArcInfo was used. The contour lines defining the topography of the parcels and the nearby area and spot heights were digitized from large-scale topographic maps (1:5000 scale, 5m contour interval) produced by the Cartographic Institute of Catalonia. From these contour lines a Digital Elevation Model was produced by means of spatial linear interpolation. The drainage lines were computed using a program developed by Martínez-Casasnovas and Stuver (1998). This automatically reproduces the best fit stream network from a DEM as compared with the stream network drawn by aerial photo-interpretation or/and field observation.

The boundaries of the elementary sampling units were computed by applying the ArcGrid function *watershed* to the outlets of the main drainage line (Figure 5.4.3).

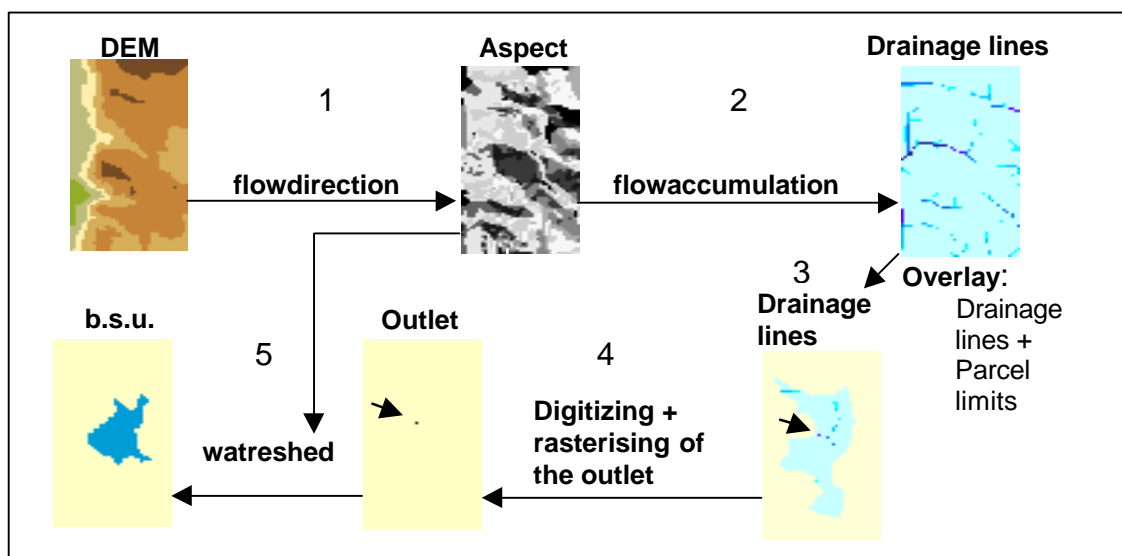


Figure 5.4.3. Automatic delineation of the basic information unit (b.s.u.).

Once the data about the 23 terrain and land use/management variables was collected, the statistical analysis of the individual factors was performed. The Student t-test was applied to quantitatively measured factors and the Chi-Square test was applied to qualitative factors. The objective of these tests was to determine the existence of significant differences between the data from parcels with observed gully erosion and from parcels without evidences of gully erosion.

The prediction of the existence of gully erosion at vineyard parcel level was based on a logistic regression of binary response (Hosmer and Lemeshow 1989, Press and Wilson 1978). The dependent variable is either the existence of gully erosion or the non-existence of gully erosion. The model computes the probability the affirmative statement occurs. The independent variables were the factors with a significant statistical relationship. In this respect, a multiple statistical analysis, stepwise regression, was performed to select the factors showing the highest relationship with gully erosion existence. The stepwise regression analysis performs an economic parameterisation since relationships among the

variables are taken into account, avoiding a problem of multi-collineasation (Bahrenberg *et al.* 1992).

A logistic regression model of binary response (existence or non-existence of gully erosion) was computed using the selected variables. This model calculates the probability the dependent variable takes the affirmative value. Quantitative as well as qualitative variables are possible in the equation. The statistical package SASTM was used to perform the mentioned statistical analysis.

The empiric-stochastical model was implemented in the Image Calculator of Idrisi, using a DEM of 25 m resolution. In this way, the probability of existence of gully erosion was computed in the entire study area. The 25 m resolution DEM was the most detailed available DEM for the entire study area. In this respect, the predictions based on the use of this DEM may produce default results.

The map of the probability of gully erosion existence was used to assess the predictions of the resulting gully erosion model. For this, 52 parcels, different from the training data set and that represent an area of 1.5% over the total study area, were sampled. Two probability levels were considered as threshold of the existence or not of gully erosion: <35% and >65%. If in reality gully erosion does not exist in a parcel the model must calculate a probability <35% to be considered as being correctly assessed. For parcels with observed gully erosion, a probability >65% is considered as a being correctly assessed.

5.4.3. Results and discussion

5.4.3.1. Gully erosion determining factors in the Alt Penedès – Anoia region

Table 5.4.3 and Table 5.4.4 summarise the results of the statistical tests performed to determine the relationship between the considered terrain and land use/management factors and the existing gully erosion.

The slope and the rate of the spatial variability of the slope degree are the quantitatively measured factors that show a highest relationship with the existence of gully erosion at vineyard parcel level (** $P < 0.01$). The high spatial variability of the slope degree is associated with complex slope forms, that produce the concentration of runoff. This concentration of runoff, either in natural ways or drainage channels, favours the development of gullies.

Table 5.4.3. Results of the t-test.

| | slope (°) | length (m) | Slope degree variance | area (m ²) | sand (%) | v. fine sand + silt (%) | clay (%) | organic matter (%) | surface stoniness (%) | stoniness Ap (%) | soil depth (cm) |
|-----------------|-----------|------------|-----------------------|------------------------|----------|-------------------------|----------|--------------------|-----------------------|------------------|-----------------|
| x ero | 5.25 | 121.4 | 1.98 | 15569.1 | 28.95 | 48.12 | 22.93 | 1.46 | 4.45 | 12.17 | 65.35 |
| x nero | 2.96 | 144.6 | 1.46 | 148631 | 35.16 | 46.09 | 18.34 | 1.74 | 8.40 | 14.73 | 68.50 |
| t-test | 6.27 | 0.99 | 2.54 | 0.12 | 1.73 | 0.80 | 2.16 | 1.98 | 1.98 | 1.15 | 0.53 |
| t-tab P=0.05 | 1.68 | 1.68 | 1.73 | 1.68 | 1.68 | 1.68 | 1.68 | 1.68 | 1.73 | 1.73 | 1.68 |
| P=0.01 | 2.42 | 2.42 | 2.54 | 2.42 | 2.42 | 2.42 | 2.42 | 2.42 | 2.54 | 2.54 | 2.42 |
| | ** | | ** | | * | | * | * | * | | |

x ero - mean of the b.s.u. with gully erosion

x nero - mean of the b.s.u. without evidences of gully erosion

t-test - calculated value

t-tab - value of the t-table for the correspondent degrees of freedom

* P <0.05

** P <0.01

Table 5.4.4. Results of the Chi-Square-test.

| | relief position | planform curvature | Profile curvature | Exposition | surface water concentration | vine rows pattern | drainage channel | levelling measures | structure | lithology |
|-------------------------|-----------------|--------------------|-------------------|------------|-----------------------------|-------------------|------------------|--------------------|-----------|-----------|
| χ^2 -test | 6.09 | 12.16 | 7.83 | 0.50 | 24.12 | 3.75 | 8.56 | 16.5 | 4.45 | 6.23 |
| χ^2 -tab P=0.05 | 9.49 | 5.99 | 5.99 | 3.84 | 3.84 | 7.81 | 3.84 | 3.84 | 7.81 | 5.99 |
| P=0.01 | | 9.21 | | | 6.63 | | 6.63 | 6.63 | | |
| | | ** | * | | ** | | ** | ** | | * |

χ^2 -test - calculated value

χ^2 -tab - value of the Chi-Square-table for the correspondent degrees of freedom

* P <0.05

** P <0.01

Some soil characteristics and the type of underlying materials also showed a relationship with the existence of gully erosion (* P<0.05). Parcels with gullies showed a higher clay content, a lower organic matter, and lower sand or surface stoniness percentages than parcels without evidences of gully erosion.

The results indicate that topographic factors and management practices that favour the concentration of runoff can be pointed as the main factors associated with the existence of gully erosion in the study area. The improvement of soil characteristics as for example organic matter content or the establishment of a mulch, can reduce the risk of gully erosion, but more effective results would be achieved by designing appropriate drainage channel networks, avoiding an excessive runoff concentration.

5.4.3.2. Prediction of existing gully erosion

5.4.3.2.1. Selection of variables (stepwise regression)

The stepwise regression analysis determined the variables *slope steepness* and *planform curvature* as the highest related to the existence of gullies in vineyard parcels (Table 5.4.5).

This indicates the formation of gullies, is mainly determined by topographic factors. Most of the parcels with observed gullies have a concave contour form. On the other hand, in 35% of the parcels without gullies the water flows upon a convex slope form and upon a rectilinear slope form in the 45% of the cases.

These results agree with the findings of Richter (1965) and Oliveira (1990), who found that the majority of the gullies appear in concave slope forms, and thus the risk of gully erosion increases in these slope forms during intense rainfalls.

Table 5.4.5. Results of the Stepwise Regression.

| Summary of Stepwise Procedure | | | | | | |
|-------------------------------|------------------|---------|-----------|------------------|-----------------|----------------|
| Step | Variable Entered | Removed | Number In | Score Chi-Square | Wald Chi-square | Pr> Chi-Square |
| 1 | SLOPE | | 1 | 8.1545 | . | 0.0043 |
| 2 | ZX | | 2 | 5.1106 | . | 0.0238 |
| 3 | ZCX | | 3 | 0.2853 | . | 0.0384 |
| 4 | | ZCX | 2 | . | 3.6635 | 0.0556 |

| Analysis of Maximum Likelihood Estimates | | | | | | | |
|--|----|---------------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------------|------------|
| Variable | DF | Parameter Estimates | Standard Error | Wald Chi-Square | Pr> Chi-Square | Standardized Estimate | Odds Ratio |
| INTERCPT | 1 | -3.2150 | 1.3296 | 5.8469 | 0.0156 | . | . |
| ZX | 1 | -3.0642 | 1.5173 | 4.0783 | 0.0434 | -0.631298 | 0.047 |
| SLOPE | 1 | 1.0197 | 0.3660 | 7.7635 | 0.0053 | 1.058461 | 2.772 |

| Association of Predicted Probabilities and Observed Responses | | | | | |
|---|---|-------|-----------|---|-------|
| Concordant | = | 85.0% | Somers' D | = | 0.782 |
| Discordant | = | 15.0% | Gamma | = | 0.700 |
| Tied | = | 0.0% | Tau-a | = | 0.357 |
| (340 pairs) | | | c | = | 0.850 |

The slope degrees of the parcels with gully erosion are higher than those without gullies. There is a wider evidence in the literature suggesting that the slope degree has a great significance in erosion processes. It includes not only sheet erosion but also linear erosion such as rill or gully forms. A higher slope degree increases the velocity of the runoff, that causes huge soil losses (Marks *et al.* 1992). López Bermudez and Albadalejo (1990) go a step further in their interpretation because they infer that a high slope degree is responsible

for an increase of runoff and for a tendency to flow concentration. Meyer *et al.* (1975) found that erosion caused by concentrated water flow increases about 20 times between a slope degree of 2 and 20%.

5.4.3.2.2. The logistic model

The application of the logistic regression analysis of binary response, with slope steepness and planform curvature as independent variables, produced an equation that computes the probability gullies are found within vineyard parcels (Equation 5.4.1).

Equation 5.4.1: Log-linear model

$$\lg(p) = -1.8744 + 0.8246 * \text{SLOPE} - 3.2843 * X - 2.0361 * R$$

where

- p = Probability of existence of gully erosion
- SLOPE = Value of slope degree (degrees)
- R = Existence of a rectilinear planform curvature
- X = Existence of a convex planform curvature

The logit-transformation of Equation 5.4.1 gives Equation 5.4.2, from which the probability p can be computed.

Equation 5.4.2: Logistic model

$$p = \frac{\exp(-1.8744 + 0.8246 * \text{SLOPE} - 3.2843 * X - 2.0361 * R)}{1 + \exp(-1.8744 + 0.8246 * \text{SLOPE} - 3.2843 * X - 2.0361 * R)}$$

The probability can take values between 0-1, although for this discussion percentage values 0-100% are used.

In the case the planform curvature is concave, the convex form *X* and the rectilinear form *R* are set to 0. The probability therefore is only determined by the slope steepness. In the case the planform curvature is convex, the variable *R* is set to 0 and the variable *X* is set to 1. The opposite happens when a rectilinear slope exists: The variable *X* is set to 0 and the variable *R* is set to 1.

If the regression coefficient that accompanies a variable takes a positive value it means the variable contributes to increase the probability gullies are found in a parcel. This is true in the case of the variable slope steepness, with its positive partial regression coefficient of 0.8246. In front of the aforesaid, a negative coefficient -3.2843 and -2.0361 respectively accompany the variables *X* and *R*. Because of that, they are regarded as variables that reduce the risk of gully erosion. In the case of a concave slope the probability of gully

erosion existence depends on the slope degree. A concave slope is therefore considered as a factor directly responsible for gully erosion.

The model was statistically assessed by the Somers'D-Coefficient, which yielded a value of 0.782 (ranged from 0 to 1), and the Goodness-of-Fit test that produced a value of 0.8424. This means the model fits the reference data (Hosmer and Lemeshow 1989). A better adjustment can be achieved by eliminating ill-fitted observations, which substantially contribute to a disagreement between the training data and the predicted values. In the present case, only one observation was considered as ill-fitted and it was rejected (Figure 5.4.4).

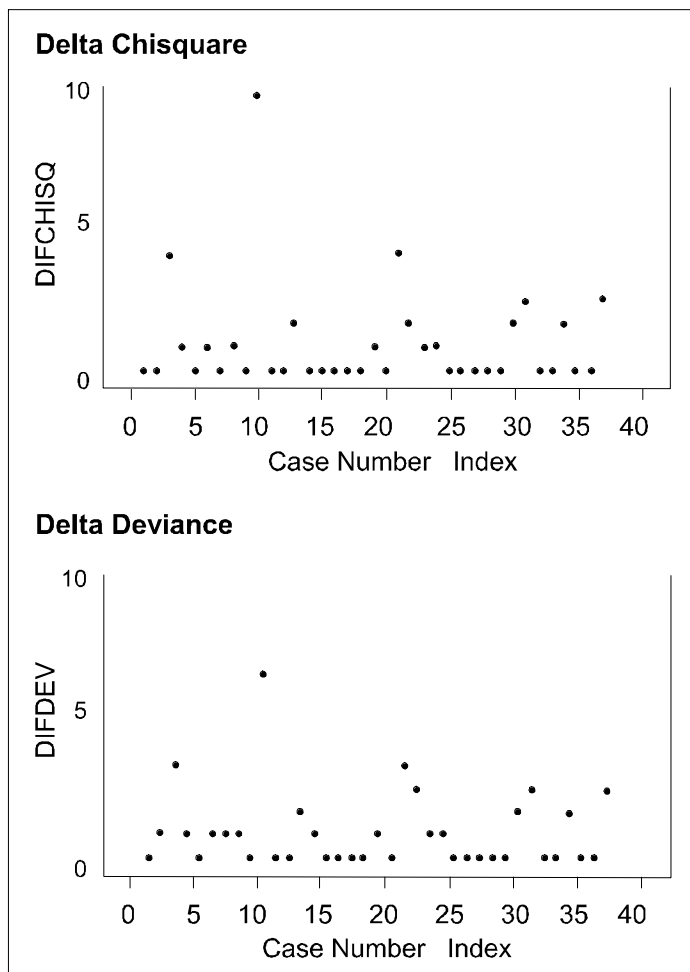


Figure 5.4.4. The results of the DIFCHISQU and DIFDEV regression diagnostics. (Observation number 10 was rejected because the high delta Chi-square and deviation differences).

5.4.3.3. Interval of confidence of the model

The existence of gullies in vineyard parcels can be analysed with respect the variation of the independent variables in Equation 5.4.2. The probability increases with slope steepness and from convex to concave slope forms. Table 5.4.6 shows an analysis of threshold slope degrees for different slope planar forms and different probabilities.

Table 5.4.6. Threshold slope degrees for different slope planar forms and probability levels.

| Probability (%) | Slope degree at convex slope forms (°) | Slope degree at rectilinear slope forms (°) | Slope degree at concave slope forms (°) |
|-----------------|--|---|---|
| 99 | 11.82 | 10.31 | 7.85 |
| 65 | 7.81 | 7.41 | 4.94 |
| 35 | 5.51 | 5.49 | 3.02 |
| 10 | 3.59 | 2.08 | - |

Vineyard parcels with convex contour form should have a slope degree of at least 11.82° to have 99% probability of development of gullies. In rectilinear slopes, a degree of 10.31° represents the threshold value for the same probability level, and in the case of the concave slopes this threshold value is 7.85°. For lower probability levels the same pattern exists (Figure 5.4.5).

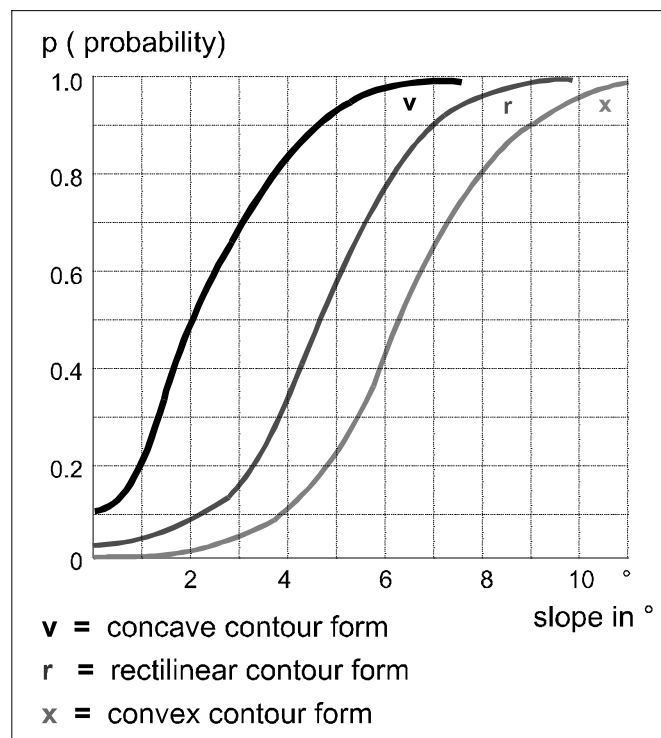


Figure 5.4.5. Logistic curves for each slope contour form.

As a general remark, logistic modelling may produce erroneous assessments when the independent values reach extreme values. In the present case, for slope degrees exceeding 31° the probability comes up to 100%, no matter what kind of slope contour form is concerned. Inaccuracies begin at a slope degree of 15° . In our study area, this should not be considered as a problem, since vineyards or other areas under cultivation only seldom occur at slopes above 15° . More attention must be paid when low slope degree values are considered. Slope degrees close to 0° produce probability values greater than 10% for parcels with concave contour forms. For other slope contour forms this problem can be ignored, but for concave contour forms the threshold slope degree below which an erroneous assessment can be made is about 1° .

5.4.3.4. Application and validation of the model

The logistic regression model (Equation 5.4.2) was applied to the Rierussa and Romani-Bribons catchment areas. For the spatial depiction of probability of the existing gully erosion in those areas, a raster slope degree map and a raster planar contour map of 25m resolution were used. Figure 5.4.6 shows the output probability map.

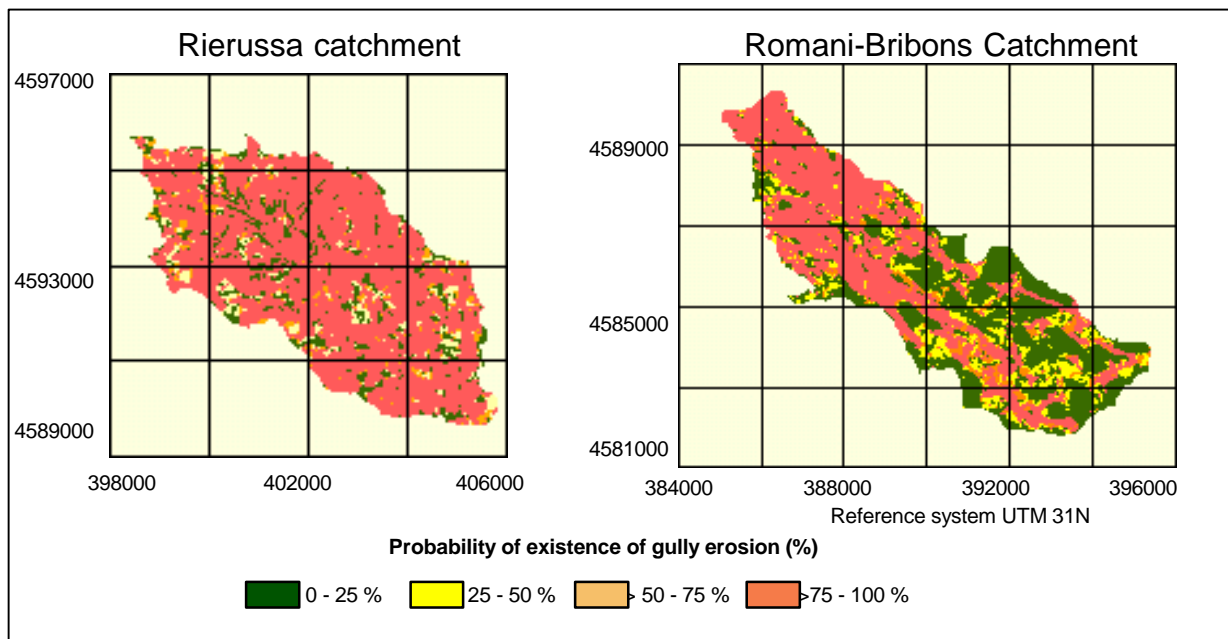


Figure 5.4.6 .Probability of existence of gully erosion at vineyard parcels in the Rierussa and Romani-Bribons catchments (Alt Penedès-Anoia region).

Parcels in the Rierussa catchment have a higher probability of existence of gully erosion. The existence of gullies is nearly everywhere possible. The main reasons are a relief with dominance of complex slopes and relative high slope degrees for agricultural uses without erosion control measures. On the other hand, in the Romani-Bribons catchment, only some areas show a high probability value. These are mainly located in the steep slopes associated to the residual planation surfaces of the adjacent piedmont landscape unit. The dissection of these landforms is controlled by Tertiary Conglomerats. However, the parts of the slopes

where calcilutites outcrop have a higher potential risk. Other extensive areas with low probability of gully existence are found in the Romani-Bribons catchment, as for example the alluvial areas of the Riera Bribons. Here, protective measures are not so essential as for the Rierussa catchment.

To assess the validity of the predictions made by the model, an error matrix was produced by comparison of reference data and predicted data (Table 5.4.7). The overall accuracy of the model is 84.6%. The high overall error of commission (39.5%) is mainly produced by parcels with probability values between 35-65%, which have not been classified in any of the established reference data categories. Probabilities between 35-65% are not usual, since the model tends to predict values close to 0 or 100% (non-existence or existence of gully erosion), and therefore are overvaluing the error. On the other hand, the overall error of omission can be considered as low (15.3%). In this case study, it mainly indicates parcels without gully erosion but with predicted gully erosion in the map. It should be considered as a permissive error, since it is saying that same parcels should need control measures when in reality the risk of gully erosion is low. A positive point of the predictive gully erosion model is that no errors of omission were found, that means existing gully erosion is always predicted as such.

Table 5.4.7. Error matrix for the assessment of the existing gully erosion prediction in the Alt Penedès-Anoia region.

| Reference data | Predicted Data | | | | Errors of Omission (%) |
|-------------------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|-------|------------------------|
| | Gully erosion p>65% | No determined 35>p>65% | No gully erosion p<35% | Total | |
| Gully erosion | 26 | 0 | 0 | 26 | 0 |
| No gully erosion | 6 | 2 | 18 | 26 | 30.7 |
| Total | 32 | 2 | 18 | 52 | |
| Errors of Commission (%) | 18.7 | 100 | 0 | | |
| Overall accuracy = 84.6% | | | | | |
| Overall error of Commission = 39.5% | | | | | |
| Overall error of Omission = 15.3% | | | | | |

The use of a lower resolution DEM for the application of the model to the entire study area, than the used for data acquisition, may produce default results. Complex micro-relief, that may led to concentration of runoff and development of gullies in some cases, is not reflected in the lower resolution DEM. In this cases, the application of the model would give erroneous predictions. Nevertheless, the use of the still detailed 25 m resolution DEM can be considered as useful in areas where a more generalised view of the existing probable gully erosion is needed for prioritisation of control planning at catchment level.

5.4.4. Conclusions

This paper presented a study of gully erosion determining factors and a methodological approach to model the probability of existence of gully erosion in vineyard parcels, using reference data from the Alt-Penedès-Anoia region (NE Spain).

The modelling of the existence of gully erosion in terms of probability can better support decision making on implementing preventive and control measures in intensive agricultural areas, where continuous tilling can mask the existence of gullies.

The proposed model is of an empiric-stochastical type. For other study areas, the methodological approach based on logistic regression is applicable. In this respect, the model increases its usefulness when the independent variables can be modelled by means of Geographical Information Systems (GIS). It will allow the automation of the application.

Regarding the results of the application of the model in the study area, under similar lithologic characteristics, topographical and management practices associated with water flow concentration showed the highest relationship with the existence of gully erosion at parcel level. The more complex slopes and the higher slope degrees the higher the probability of finding gullies in vineyard parcels. In this respect, the ranking of the probability of existence of gully erosion can be useful in the prioritisation of soil conservation planning at catchment level.

5.4.5. References

- Bahrenberg, G., E. Giese, and J. Nipper.** 1992. *Statistische Methoden in der Geographie. Vol. 2: Multivariate Statistik.* Teubner Studienbücher Geographie. Stuttgart.
- Crouch, R.J. and Blong, R.J.** 1989. Gully sidewall classification: methods and applications. *Zeitschr. F. Geomorphologie, N.F.*, 33 (3): 291-305.
- Donker, N.H.W. and M.C. J. Damen.** 1984. Gully system development and assessment of gully initiation risk in Miocene deposits near Daroca – Spain. *Zeitschr. F. Geomorphologie, N.F.*, Supplement-Bd 49: 37-50.
- Heede, H.** 1970. Morphology of gullies in the Colorado Rocky mountains. *Bulletin International Association Society of Hydrology*, 15: 42-50.
- Heede, H.** 1979. *Gully development and control.* USDA Forest Service Research Paper RM-169, Second edition. Fort Collins.
- Hill, J.** 1993. Monitoring land degradation and soil erosion in Mediterranean environments. *ITC Journal*, 4: 323-331.
- Hosmer, D.W. and S. Lemeshow.** 1989. *Applied logistic regression.* Hohn Wiley and Sons, Inc. New York.
- Imeson, A.C. and Kwaad, F.J.P.M.** 1980, Gully types and gully prediction. *K.N.A.G. Geografisch Tijdschrift*, XVI (1980), 5: 430-441.
- Ireland, H. A., C.F. Sharpe and D.H. Eargle.** 1939. *Principles of gully erosion in the Piedmont of South Carolina.* US Department of Agriculture Technological Bulletin 63.
- Laflen, J.M., D.A. Watson, D.A. and T.G. Franti.** 1986. Ephemeral gully erosion. *Proceedings of the Fourth Federal Interagency Sedimentation Conference*, 23.-27. March, Las Vegas, pp. 3.29-3.37.
- López Bermúdez, F. and J. Albadalejo.** 1990. Factores ambientales de la degradación del suelo en el área mediterránea. In: *Degradación y Regeneración del suelo en condiciones ambientales mediterráneas*, J. Albadalejo, M.A. Stocking and E. Díaz (Editors), Murcia, pp.15-45.
- Marks, R., J.M. Müller, H. Leser, and H.J. Klink.** 1992. Anleitung zur Bewertung des Leistungsvermögens des Landschaftshaushaltes. *Forschungen zur deutschen Landeskunde*, Vol. 229. Selbstverlag, Trier.
- Martínez-Casasnovas, J.A.** 1998. *Suelos-Paisaje-Erosión. Erosión por cárcavas y barrancos en el Alt Penedès – Anoia (Cataluña). Un enfoque de estudio mediante tecnologías de la información espacial: Bases de datos, Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Teledetección.* PhD Thesis (unpublished), University of Lleida, Lleida.
- Martínez-Casasnovas, J.A. and J. Stuiiver.** 1998. Automatic delineation of drainage networks and elementary catchments from Digital Elevation Models. *ITC Journal*, (in press).

- Meyer, L.D., G.R. Foster, M.J.M. Romkens.** 1975. *Source of soil eroded by water from upland slopes*. U.S. Dep. Agr. Agric. Res. Serv. (ARS-S-40).
- Oliveira, M.A.T. De.** 1990. Slope Geometry and gully erosion development: Bananal, São Paulo, Brazil. *Zeitschr. Fur Geomorphologie, N.F.*, 34 (4): 423-434.
- Poesen, J.** 1989. Conditions for gully formation in the Belgian Loam Belt and some ways to control them. *Soil Technology Series*, 1: 39-52.
- Poesen, J. and G. Govers.** 1990. Gully Erosion in the Loam Belt of Belgium: Typology and Control Measures. In: *Soil Erosion on Agricultural Land*, J. Boardman, I.D.L. Foster and J.A. Dearing (Editors), John Wiley & Sons Ltd., pp: 513-530.
- Porta, J., M.C. Ramos and J. Boixadera.** 1994. Mechanical measures for runoff management and erosion control in the vineyards of North East Spain. In: *Conserving soil resources: European perspective*, Edited by R.J. Rickson, (Wallingford: CAB International), pp. 369-378.
- Press, S.J. and S. Wilson.** 1978. Choosing between Logistic Regression and Discriminant Analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 73: 699-705.
- Ramos, M.C. and J. Porta.** 1993. Modelos de distribución espacio-temporal de las lluvias en la zona Mediterránea del Anoia-Penedés. Influencia en la sostenibilidad de los cultivos de la zona. *Ecología*, 7: 47-56.
- Ramos, M.C. and J. Porta.** 1994. Rainfall intensity and erosive potenciality in the NE Spain Mediterranean area. *Il Nuovo Cimento*, 17C, 3: 291-299.
- Richter, G.** 1965. *Bodenerosion, Schäden und gefährdete Gebiete in der Bundesrepublik Deutschland*. Gutachten vorgelegt vom Inst. f. Landekde, Selbstverlag d. Banst. f. Landeskdde und Raumforschg, Bad Godesberg.
- Rieger, W.** 1993. Hydrological terrain features derived from a pyramid raster structure. In: *Application of Geographical Information Systems in hydrology and water resources management*, K Kovar and H P Natchnebel (editors), IAHS Publication num. 211, Oxfordshire., pp. 201-210.
- Seginer, I.** 1966. Gully development and sediment yield. *Journal of Hydrology*, 4: 236-253.
- SSS.** 1996. *Keys to Soil Taxonomy*. Seventh Edition 1996. U.S. Department of Agriculture – Natural Resources Conservation Service, Washington, D.C.
- Stocking, M.A.** 1980, Examination of the factors controlling gully growth. In *Assessment of erosion*, M. De Boodt and D. Gabriels (editors), John Wiley and Sons, Chichester, pp 505-520.
- Thompson, J.R.** 1964. Quantitative effect of watershed variables on rate of gully head advancement. *Transactions of the ASAE*, 7: 54-55.
- Uson, A.** 1998. *Medidas de control de erosión en suelos de viña de las comarcas Anoia-Alt Penedès (Barcelona): Efectividad y Viabilidad*. PhD Thesis, Universitat de Lleida, Lleida.

Vandaele, K., J. Poesen, G. Govers and B. Van Wesemael. 1996. Geomorphic threshold conditions for ephemeral gully incision. *Geomorphology*, 16: 161-173.

Williams, A.R. and R.P.C. Morgan. 1976. Geomorphological mapping applied to erosion evaluation. *Journal of Soil and Water Conservation*. Vol. 31 (4): 164-168.

Zinck, J.A. 1997. Riesgos ambientales y suelos. Enfoques para la modelización de la erosión por cárcavas y movimientos en masa. *Edafología*, special edition of the 50th anniversary of the Spanish Soil Science Society, pp 283-297.

6. Conclusiones generales

6. Conclusiones generales

1) Sobre el uso de tecnologías de la información espacial como metodologías de investigación:

- La presente investigación ha permitido la ampliación de la aplicabilidad de las tecnologías de la información espacial (bases de datos, sistemas de información geográfica (SIG) y teledetección), al análisis del terreno y a la planificación territorial. En concreto, las aportaciones más significativas se centran en:

A) *Cartografía y modelización de los procesos de erosión por cárcavas y barrancos*: a) método de delineación automática de la red de drenaje a partir de modelos digitales de elevaciones (MDE) y SIG, b) estimación de las tasas de erosión por cárcavas y barrancos a partir de la superposición de MDE multitemporales y fotografías aéreas multitemporales mediante SIG, c) uso de los SIG y MDE como metodología para el desarrollo y aplicación de un modelo de probabilidad de existencia de cárcavas, y d) desarrollo y aplicación del modelo evolutivo de retroceso de las paredes de barrancos por medio de funciones de distancias basadas en costos en SIG.

B) *Análisis de geoformas y sistema de información de suelos*: a) método para automatizar la obtención de relaciones espaciales complejas como la adyacencia o vecindad de unidades cartográficas de mapas vectoriales mediante SIG y bases de datos, b) modelo conceptual de base de datos del sistema de información de suelos, basado en el modelo de suelo-paisaje, que refleja las relaciones suelo-paisaje subyacentes en la información de suelos adquirida, y reduce la complejidad de la estructura de datos.

C) *Análisis de la cubierta vegetal/ usos del territorio*: método para la expresión de la variabilidad del contenido de clases de cubierta vegetal/ usos de las unidades cartográficas de mapas o coberturas resultado de la clasificación de imágenes de satélite multiespectrales.

- Estas tecnologías de la información espacial constituyen la base metodológica de la presente investigación, y los métodos desarrollados son aplicables a otros casos de estudio.
- Se confirma la importancia de combinar técnicas de campo, laboratorio, con las técnicas de teledetección, para la adquisición de datos, y con las de SIG para su procesamiento con fines de modelización.

2) Sobre el análisis de las geoformas, distribución y propiedades de los suelos y procesos de erosión por cárcavas y barrancos en el área de estudio:

- La presente investigación confirma la importante influencia de la acción antrópica en la aceleración de los procesos de erosión actual, como consecuencia de una deforestación generalizada con roturación de tierras para la plantación de viña a partir de la Edad Media, con la introducción del sistema de contratos de *Rabassa Morta*.
- La aceleración de los procesos de erosión actual se ve particularmente reflejada en: a) el análisis de las propiedades de los suelos, con la puesta en superficie de materiales de horizontes subyacentes ricos en carbonato cálcico o de materiales originarios como

calcilutitas o areniscas, desfavorables para el uso agrícola sostenible, b) el análisis morfométrico y morfográfico de las geoformas, que muestra un modelado del paisaje que ha dado lugar a vertientes complejas y barrancos, con una alta densidad de cárcavas incipientes, y c) en el análisis de las tasas de erosión por cárcavas y barrancos, que han sido particularmente elevadas a partir de la mecanización de los cultivos y la eliminación de medidas de conservación de suelos y aguas a nivel de parcela.

- El estado de degradación de las propiedades de los suelos también se ve influido por actuaciones antrópicas como el diseño de nuevas parcelas para las plantaciones modernas de viña, mediante grandes movimientos de tierra, que actualmente parece un hecho imparable en el área de estudio.
- En este sentido, uno de los resultados principales de la presente investigación es el sistema de información de suelos desarrollado a nivel de toda el área de estudio, que sirve para conocer los principales tipos de suelos, su distribución espacial, sus propiedades y su comportamiento frente a la acción de los procesos erosivos y actuaciones antrópicas. Este sistema de información de suelos constituye, además, un primer paso sobre el cual realizar la cartografía a nivel más detallado de las áreas a transformar.

3) Temas para una futura investigación:

Tras la presente investigación, dos temas principales han sido identificados como de interés para ser desarrollados en futuros proyectos de investigación:

- El desarrollo de una estructura de agregación de la información de suelos, que permita generalizar y especializar (facilitar un mayor nivel de detalle) la información. A este respecto ya hemos empezado a trabajar, realizando algunos estudios de base y dirigiendo algunos trabajos, tanto de cartografía de suelos más detallada en áreas modelo, a partir del modelo suelo-paisaje de la presente investigación, como sobre estructuras de la información para la generalización automatizada de bases de datos espaciales de suelos.
- El desarrollo de un modelo evolutivo de crecimiento de las cárcavas y barrancos según el enfoque metodológico propuesto, que permita predecir con mayor fiabilidad el crecimiento de cárcavas y barrancos. En este sentido, es necesaria la utilización de modelos digitales de elevaciones de mayor resolución espacial, mayor investigación en la búsqueda de los factores relacionados con la erosión por cárcavas y barrancos, y/o mayor investigación sobre la influencia de cada factor en los procesos de erosión.

ANEJOS

Anejo 1

Descripción de las unidades taxonómicas y principales características físico-químicas de los perfiles modales del Sistema de Información de Suelos del Alt Penedès - Anoia

| | |
|--|---|
| Código de la Familia | APP1 |
| Clasificación taxonómica | <i>Palexeralf Petrocálcico, arcillosa fina, mezclada (calcárea), térmica</i> (SSS 1975 y 1996) <i>Luvisol cálcico</i> (FAO 1990) |
| Secuencia de horizontes genéticos | Ap-Bt-Bkn-Bkm |
| Horizontes diagnóstico | Epipedión Óchrnico, endopediones Argflico, Cálcico y Petrocálcico |
| Profundidad de los suelos | Muy profundos |
| Material originario | Detríticos terrígenos finos |
| Clase de drenaje | Bien drenados |
| Clase de infiltración | Rápida |
| Conductividad hidráulica | Moderada |
| CRAD | Moderada |
| Compactación (según densidad aparente) | Pueden presentar problemas al desarrollo radicular por alta densidad aparente del horizonte Bt (argflico) |
| Texturas desde la superficie | Moderadamente finas a finas |
| Elementos gruesos | Pocos o muy pocos |
| Localización | Glacis del Área de pie de monte |
| Pediones representativos | PM05 |
| Perfil modal | APP1-1 |
| Características diferenciales de la Familia: | |
| <p>El horizonte Ap tiene un espesor de 30-40 cm. Su textura es franco arcillosa y contiene pocos elementos gruesos (1-5%). Su contenido de carbonatos es muy bajo (4-5%) aunque presenta una alta respuesta al HCl 11%. La reacción es moderadamente básica (pH 7.9-8.3).</p> <p>La sección control se corresponde con el horizonte argflico. Tiene una textura arcillo limosa, con un contenido de arcilla del 41% y de arena del 15%. Contiene muy pocos elementos gruesos (<1%). El contenido de carbonatos es bajo o muy bajo (1-7%). La mineralogía es mezclada, presentando una baja respuesta al HCl 11%. La reacción es medianamente o moderadamente básica (pH 7.7-8.0).</p> <p>Por debajo de la sección control se encuentra un horizonte cálcico, que presenta frecuentes acumulaciones de carbonatos (2-20% en volumen) en forma de rizoconcrecciones. Por debajo de éste suele aparecer un horizonte petrocálcico muy fuertemente cementado.</p> | |

Perfil modal APP1-1

| Horz. genético | Horz. diagnost. | | Prof. Mínima (cm) | PH (1:2.5) | CE (1:5) | CaCO3 (%) | Mat. Orgánica (%) | Caliza activa (%) |
|------------------|-----------------|----------|-------------------|-----------------------|---------------|-----------------|--------------------------------------|-------------------|
| Ap | Óchrnico | | 37 | 8.1 | 0.1 | 16.8 | 1.0 | 6.3 |
| Bt | Argflico | | 74 | 7.8 | 0.11 | 4.1 | | |
| Bkn | Cálcico | | 120 | 7.9 | 0.12 | 28.0 | | |
| Bkm | Petrocálcico | | 152 | | | | | |
| Arena gruesa (%) | Arena fina (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | Clase textural (USDA) | Hdad. -33 kpa | Hdad. -1500 kpa | Densidad aparente kg m ⁻³ | |
| 3.1 | 11.6 | 56.4 | 28.9 | Franco arcillosa | 23.1 | 13.2 | 1440 | |
| 4.4 | 10.8 | 43.6 | 41.2 | Arcillo limosa | 26.1 | 16.9 | 1700 | |
| 7 | 14.2 | 43.7 | 35.1 | Franco arcillosa | 21.4 | 11.7 | 1610 | |
| | | | | | | | | |

| | |
|---|--|
| Código de la Familia | AHC1 |
| Clasificación taxonómica | <i>Haploxeralf Cálculo, franca fina, carbonática, térmica</i> (SSS 1975 y 1996) <i>Luvisol cálcico</i> (FAO 1990) |
| Secuencia de horizontes genéticos | Ap-Btkn |
| Horizontes diagnóstico | Epipedión Óchrnico, endopedión Argílico |
| Profundidad de los suelos | Profundos |
| Material originario | Detríticos terrígenos finos |
| Clase de drenaje | Bien drenados |
| Clase de infiltración | Moderadamente lenta |
| Conductividad hidráulica | Moderada |
| CRAD | Alta |
| Compactación (según densidad aparente) | Generalmente no presentan problemas al desarrollo radicular |
| Texturas desde la superficie | Medias |
| Elementos gruesos | Frecuentes |
| Localización | Glacis del Área de pie de monte |
| Pediones representativos | TL54 |
| Perfil modal | AHC1-P1 |
| Características diferenciales de la Familia: | |
| <p>El horizonte Ap tiene un espesor de 30 cm. Su textura es franco arcillo limosa y tiene frecuentes elementos gruesos (5-15%). El contenido de carbonatos es alto o muy alto (40%) y su reacción es moderadamente básica (pH 8.1).</p> <p>La sección control se corresponde con el horizonte argílico, que está recarbonatado. Presenta una textura franco arcillo limosa, con un contenido de arcilla del 32% y de arena del 50%. Tiene frecuentes elementos gruesos (5-15%). La mineralogía es carbonática. Presenta un contenido de carbonatos muy alto (46%), con acumulaciones muy abundantes (>40% en volumen) en forma de nódulos y rizoconcrecciones. La reacción es moderadamente básica (pH 8.1).</p> | |

Perfil modal AHC1-P1

| Horz. genético | Horz. diagnost. | | Prof. Mínima (cm) | PH (1:2.5) | CE (1:5) | CaCO ₃ (%) | Mat. Orgánica (%) | Caliza activa (%) |
|------------------|-----------------|----------|-------------------|-----------------------|----------|-----------------------|-------------------|--------------------------------------|
| Ap | Óchrnico | | 30 | 8.1 | 0.10 | 40.0 | 0.5 | 5.1 |
| Btkn | Argílico | | 100 | 8.1 | 0.10 | 32.0 | | |
| 2Bkn | Cálculo | | 150 | 8.2 | 0.09 | 73.0 | | |
| Arena gruesa (%) | Arena fina (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | Clase textural (USDA) | | Hdad. -33 kpa | Hdad. -1500 kpa | Densidad aparente kg m ⁻³ |
| 13.0 | 37.5 | 26.3 | 23.2 | F. arcillo arenosa | | 18.0 | 8.1 | 1550 |
| 24.4 | 26.1 | 17.3 | 32.2 | F. arcillo arenosa | | 22.1 | 11.9 | 1570 |
| 3.4 | 9.3 | 70.9 | 16.4 | Franco limosa | | 21.6 | 7.4 | |

| | |
|--|--|
| Código de la Familia | AHT1 |
| Clasificación taxonómica | <i>Haploxeralf Típico, esquelética franca, mezclada (calcárea), térmica</i> (SSS 1975 y 1996) <i>Luvisol háplico</i> (FAO 1990) |
| Secuencia de horizontes genéticos | Ap-Ctk |
| Horizontes diagnóstico | Epipedión Óchrico, endopedión Argílico |
| Profundidad de los suelos | Poco profundos |
| Material originario | Detríticos terrígenos con gravas metamórficas |
| Clase de drenaje | Drenaje rápido |
| Clase de infiltración | Moderada |
| Conductividad hidráulica | Moderada |
| CRAD | Baja |
| Compactación (según densidad aparente) | Generalmente no presentan problemas para el desarrollo radicular |
| Texturas desde la superficie | Medias a moderadamente finas |
| Elementos gruesos | Frecuentes a muy abundantes |
| Localización | Glacis de pie de monte |
| Pediones representativos | PM08 |
| Perfil modal | AHT1-P1 |
| Características diferenciales de la Familia: | |
| <p>El horizonte Ap tiene un espesor de 35 cm. Su textura es franca y tiene frecuentes elementos gruesos (5-15%). El contenido de carbonatos es medio (10-20%) y su reacción es moderadamente básica (pH 8.2).</p> <p>La sección control se corresponde con el horizonte argílico. Presenta una textura franco arcillo arenosa, con un contenido de arcilla del 27% y de arena del 62%. Tiene muy abundantes elementos gruesos (>70%). La mineralogía es mezclada. Presenta un contenido de carbonatos muy bajo (4%). Puede presentar acumulaciones de carbonatos en forma de cemento geopetal (<2% en volumen), disminuyendo en profundidad. La reacción es moderadamente básica (pH 8.2).</p> | |

Perfil modal AHT1-P1

| Horz. genético | | Horz. diagnost. | | Prof. Mínima (cm) | PH (1:2.5) | CE (1:5) | CaCO3 (%) | Mat. Orgánica (%) | Caliza activa (%) |
|------------------|----------------|-----------------|-------------|-----------------------|------------|---------------|-----------------|--------------------------------------|-------------------|
| Ap | | Óchrico | | 35 | 8.2 | 0.11 | 15.3 | 1.5 | 6.3 |
| Btk | | Argílico | | 100 | 8.2 | 0.10 | 4.0 | | |
| Arena gruesa (%) | Arena fina (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | Clase textural (USDA) | | Hdad. -33 kpa | Hdad. -1500 kpa | Densidad aparente kg m ⁻³ | |
| 21.6 | 26.2 | 33.9 | 18.3 | Franca | | 21.3 | 8.2 | 1540 | |
| 42.4 | 19.6 | 11.0 | 27.0 | F.arcillo limosa | | 21.9 | 10.4 | | |

| | |
|---|---|
| Código de la Familia | IXP1 |
| Clasificación taxonómica | <i>Xerochrept Petrocálcico, franca gruesa, mezclada, térmica</i> (SSS 1975 y 1996) <i>Calcisol pétrico</i> (FAO 1990) |
| Secuencia de horizontes genéticos | Ap-Bw-Bkm |
| Horizontes diagnóstico | Epipedión Óchrico, endopediones Cámbico y Petrocálcico |
| Profundidad de los suelos | Profundos |
| Material originario | Depósitos detríticos con gravas poligénicas |
| Clase de drenaje | Bien drenados |
| Clase de infiltración | Moderada |
| Conductividad hidráulica | Lenta |
| CRAD | Baja |
| Compactación (según densidad aparente) | Generalmente no presentan problemas al desarrollo radicular |
| Texturas desde la superficie | Medias |
| Elementos gruesos | Frecuentes |
| Localización | Plataformas residuales del área de pie de monte |
| Pediones representativos | ML27 |
| Perfil modal | IXP1-P1 |
| Características diferenciales de la Familia: | |
| <p>El horizonte Ap tiene un espesor de 30 cm. Es de textura franco limosa, con frecuentes elementos gruesos (5-15%). Presenta una respuesta muy alta al HCl 11% y su reacción es moderadamente básica (pH 7.9).</p> <p>La sección control del perfil (desde el límite inferior del Ap hasta el contacto con el horizonte petrocálcico a 85 cm) se corresponde con un horizonte Cámbico. Es de textura franca, con un contenido de arcilla del 15% y de arena del 39%. Tiene frecuentes elementos gruesos (5-15%). La mineralogía es mezclada y presenta una respuesta al HCl 11% muy alta. Tiene una reacción moderadamente básica (pH 8.1).</p> <p>Por debajo de la sección control aparece un horizonte petrocálcico muy fuertemente cementado.</p> | |

Perfil modal IXP1-P1

| Horz. genético | | Horz. diagnost. | | Prof. Mínima (cm) | PH (1:2.5) | CE (1:5) | CaCO ₃ (%) | Mat. Orgánica (%) | Caliza activa (%) |
|------------------|----------------|-----------------|-------------|-----------------------|------------|---------------|-----------------------|--------------------------------------|-------------------|
| Ap | | Óchrico | | 30 | 7.9 | 0.14 | 53.8 | 2.3 | 17.6 |
| Bw | | Cámbico | | 85 | 8.1 | 0.14 | 35.0 | | |
| Bkm | | Petrocálcico | | 150 | | | | | |
| Arena gruesa (%) | Arena fina (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | Clase textural (USDA) | | Hdad. -33 kpa | Hdad. -1500 kpa | Densidad aparente kg m ⁻³ | |
| 7.2 | 20.5 | 55.6 | 16.7 | Franco limosa | | 23.2 | 6.9 | 1520 | |
| 9.3 | 29.7 | 46.2 | 14.8 | Franca | | 18.9 | 6.3 | 1570 | |
| | | | | | | | | | |

| | |
|--|---|
| Código de la Familia | IXP2 |
| Clasificación taxonómica | <i>Xerochrept Petrocálcico, franca, mezclada, térmica, superficial</i> (SSS 1975 y 1996) |
| | <i>Calcisol pétrico</i> (FAO 1990) |
| Secuencia de horizontes genéticos | Ap-Bkm |
| Horizontes diagnóstico | Epipedión Óchrnico, endopedión Petrocálcico |
| Profundidad de los suelos | Poco profundos |
| Material originario | Depósitos detríticos con gravas poligénicas |
| Clase de drenaje | Drenaje rápido |
| Clase de infiltración | Moderada |
| Conductividad hidráulica | Lenta |
| CRAD | Muy baja |
| Compactación (según densidad aparente) | No presentan problemas al desarrollo radicular |
| Texturas desde la superficie | Medias |
| Elementos gruesos | Frecuentes |
| Localización | Plataformas residuales del área de pie de monte |
| Pediones representativos | TL59 |
| Perfil modal | IXP2-P1 |
| Características diferenciales de la Familia: | |
| <p>La sección control se limita al horizonte Ap, que tiene un espesor de 40 cm y es de textura franca o franco limosa, con un contenido de arcilla entre 19-24% y de arena entre 24-42%. El contenido de carbonatos es muy alto (50%). La mineralogía es mezclada y presenta una respuesta muy alta al HCl 11%. Su reacción es moderadamente básica (pH 7.8-8.3).</p> <p>El horizonte subyacente es un petrocálcico muy fuertemente cementado.</p> | |

Perfil modal IXP2-P1

| Horz. Genético | Horz. diagnost. | | Prof. Mínima (cm) | PH (1:2.5) | CE (1:5) | CaCO ₃ (%) | Mat. Orgánica (%) | Caliza activa (%) |
|------------------|-----------------|----------|-------------------|-----------------------|---------------|-----------------------|--------------------------------------|-------------------|
| Ap | Óchrnico | | 40 | 8.0 | 0.14 | 49.8 | 1.8 | 15.6 |
| Bkm | Petrocálcico | | 75 | | | | | |
| Arena gruesa (%) | Arena fina (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | Clase textural (USDA) | Hdad. -33 kpa | Hdad. -1500 kpa | Densidad aparente kg m ⁻³ | |
| 19.5 | 22.5 | 33.6 | 24.4 | Franca | 20.5 | 8.1 | 1400 | |
| | | | | | | | | |

| | |
|---|---|
| Código de la Familia | IXF1 |
| Clasificación taxonómica | <i>Xerochrept Fluvéntico, limosa fina, mezclada (calcárea), térmica</i> (SSS 1975 y 1996) <i>Calcisol háptico</i> (FAO 1990) |
| Secuencia de horizontes genéticos | Ap-Bkn; Ap-Bkn-2Crkn |
| Horizontes diagnóstico | Epipedión Óchrnico, endopedión Cálculo |
| Profundidad de los suelos | Profundos o muy profundos |
| Material originario | Detríticos terrígenos finos |
| Clase de drenaje | Bien drenados |
| Clase de infiltración | Moderada |
| Conductividad hidráulica | Lenta |
| CRAD | Muy alta |
| Compactación (según densidad aparente) | Generalmente no presentan problemas al desarrollo radicular |
| Texturas desde la superficie | medias a moderadamente finas |
| Elementos gruesos | Pocos |
| Localización | Vertientes de pendiente suave y fondos de valle |
| Pediones representativos | PM15 (suelos profundos) y PP39 (suelos muy profundos) |
| Perfil modal | IXF1-P1, IXF1-P2 |
| Características diferenciales de la Familia: | |
| <p>El horizonte Ap tiene un espesor de 30-45 cm. Es de textura franca y tiene pocos elementos gruesos (1-5%). Tiene un contenido de carbonatos moderadamente alto o alto (22-39%) y presenta una respuesta muy alta al HCl 11%. La reacción es moderadamente básica (pH 8.0-8.2).</p> <p>La sección control del perfil (desde el límite inferior del Ap hasta 1 m) lo constituye típicamente un horizonte cálcico, con frecuentes acumulaciones de carbonatos en forma de nódulos (2-10% en volumen), aumentando en profundidad. Es de texturas franco limosa o franco arcillo limosa, con un contenido de arcilla entre 18-22% y de arena entre 11-13%. La mineralogía es mezclada y presenta una respuesta al HCl 11% muy alta. El contenido de carbonatos es moderadamente alto o alto (25-35%). La reacción es moderadamente básica (pH 8.0-8.2). Presenta carácter fluvéntico (contenido de 0.36% de carbono orgánico a 125 cm).</p> <p>En ocasiones el material subyacente, por debajo de los 120 cm, son calcilitas, de texturas Franco arcillo limosas, que presentan frecuentes acumulaciones de carbonatos en forma de nódulos.</p> | |

Perfil modal IXF1-P1

| Horz. genético | Horz. diagnost. | | Prof. Mínima (cm) | PH (1:2.5) | CE (1:5) | CaCO ₃ (%) | Mat. Orgánica (%) | Caliza activa (%) |
|------------------|-----------------|----------|-------------------|-----------------------|----------|-----------------------|-------------------|--------------------------------------|
| Ap | Óchrnico | | 37 | 8.1 | 0.13 | 30.4 | 1 | 10.0 |
| Bkn | Cálculo | | 160 | 8.1 | 0.13 | 31.8 | 0.6 | |
| Arena gruesa (%) | Arena fina (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | Clase textural (USDA) | | Hdad. -33 kpa | Hdad. -1500 kpa | Densidad aparente kg m ⁻³ |
| 3.4 | 32.3 | 46.5 | 17.8 | Franca | | 20.6 | 7.7 | 1630 |
| 1.1 | 10.2 | 67.4 | 21.3 | Franco limosa | | 22.7 | 8.6 | 1620 |

Perfil modal IXF1-P2

| Horz. genético | | Horz. diagnost. | | Prof. Mínima (cm) | PH (1:2.5) | CE (1:5) | CaCO3 (%) | Mat. Orgánica (%) | Caliza activa (%) |
|------------------|----------------|-----------------|-------------|----------------------------------|------------|---------------|-----------------|--------------------------------------|-------------------|
| Ap | | Óchrico | | 37 | 8.1 | 0.13 | 30.4 | 1 | 10.0 |
| Bkn | | Cálcico | | 120 | 8.1 | 0.13 | 31.8 | 0.6 | |
| Crkn | | Cálcico | | 150 | | | | | |
| Arena gruesa (%) | Arena fina (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | Clase textural (USDA) | | Hdad. -33 kpa | Hdad. -1500 kpa | Densidad aparente kg m ⁻³ | |
| 3.4 | 32.3 | 46.5 | 17.8 | Franca | | 20.6 | 7.7 | 1630 | |
| 1.1 | 10.2 | 67.4 | 21.3 | Franco limosa | | 22.7 | 8.6 | 1620 | |
| | | | | F.arcillo limosa (prueba previa) | | | | | |

| | |
|--|--|
| Código de la Familia | IXC1 |
| Clasificación taxonómica | <i>Xerochrept Calcixeróllico, franca fina, mezclada, térmica</i> (SSS 1975 y 1996) <i>Calcisol háptico</i> (FAO 1990) |
| Secuencia de horizontes genéticos | Ap-Bkn-2Crkn |
| Horizontes diagnóstico | Epipedión Óchrnico y endopedión Cálculo |
| Profundidad de los suelos | Muy profundos |
| Material originario | Detríticos terrígenos finos o Calcilititas |
| Clase de drenaje | Bien drenados |
| Clase de infiltración | Moderada |
| Conductividad hidráulica | Lenta |
| CRAD | Muy alta |
| Compactación (según densidad aparente) | Pueden presentar problemas para el desarrollo radicular por debajo del horizonte Ap |
| Texturas desde la superficie | Medias |
| Elementos gruesos | Pocos |
| Localización | Vertientes de pendiente suave y terrazas |
| Pediones representativos | PM06 (suelos muy profundos) y PM07 (suelos profundos o moderadamente profundos) |
| Perfil modal | IXC1-P1 y IXC1-P2 |
| Características diferenciales de la Familia: | |
| <p>El horizonte Ap tiene un espesor de 30-50 cm. Es de textura franca, con pocos elementos gruesos (1-5%). El contenido de carbonatos es de medio a alto (12.5-38%) y presenta una respuesta muy alta al HCl 11%. La reacción es moderadamente básica (pH 7.8-8.4).</p> <p>La sección control del perfil (desde el límite inferior del Ap hasta 1 m o hasta el contacto paráltico a 60 cm) la constituye un horizonte cálcico, que presenta frecuentes acumulaciones de carbonatos en forma de nódulos (2-20% en volumen). Es de textura franco limosa, con un contenido de arcilla de 19-31% y de arena entre 24-32%. Tiene pocos elementos gruesos (1-5%). La mineralogía es mezclada, presentando una respuesta muy alta al HCl 11%. El contenido de carbonatos es moderadamente alto o alto (24-40%). La reacción es medianamente básica o ligeramente alcalina (pH 7.5-8.5).</p> <p>El horizonte subyacente son calcilititas, que presentan frecuentes acumulaciones de carbonatos en forma de nódulos (2-20% en volumen). Su textura es Franco arcillo limosa. Tiene un alto contenido de carbonatos (40%) y su reacción es ligeramente alcalina (pH 8.7).</p> | |

Perfil modal IXC1-P1

| Horz. genético | Horz. Diagnost. | | Prof. Mínima (cm) | PH (1:2.5) | CE (1:5) | CaCO ₃ (%) | Mat. Orgánica (%) | Caliza activa (%) |
|------------------|-----------------|----------|-------------------|-----------------------|----------|-----------------------|-------------------|--------------------------------------|
| Ap | Óchrnico | | 40 | 8.1 | 0.14 | 30.9 | 1.1 | 12.7 |
| Bkn | Cálculo | | 165 | 8.1 | 0.14 | 32.7 | | |
| Arena gruesa (%) | Arena fina (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | Clase textural (USDA) | | Hdad. -33 kpa | Hdad. -1500 kpa | Densidad aparente kg m ⁻³ |
| 5.6 | 27.8 | 45.3 | 21.3 | Franca | | 23.0 | 7.6 | 1540 |
| 3.1 | 23.6 | 50.6 | 22.7 | Franco limosa | | 26.3 | 8.5 | 1700 |

Perfil modal IXC1-P2

| Horz. genético | | Horz. Diagnost. | | Prof. Mínima (cm) | PH (1:2.5) | CE (1:5) | CaCO3 (%) | Mat. Orgánica (%) | Caliza activa (%) |
|------------------|----------------|-----------------|-------------|-----------------------------------|------------|---------------|-----------------|--------------------------------------|-------------------|
| Ap | | Óchrico | | 40 | 8.1 | 0.14 | 30.9 | 1.1 | 12.7 |
| Bkn | | Cálcico | | 80 | 8.1 | 0.14 | 32.7 | | |
| Crkn | | Cálcico | | 150 | 8.2 | 0.21 | 40.0 | | |
| Arena gruesa (%) | Arena fina (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | Clase textural (USDA) | | Hdad. -33 kpa | Hdad. -1500 kpa | Densidad aparente kg m ⁻³ | |
| 5.6 | 27.8 | 45.3 | 21.3 | Franca | | 23.0 | 7.6 | 1540 | |
| 3.1 | 23.6 | 50.6 | 22.7 | Franco limosa | | 26.3 | 8.5 | 1700 | |
| | | | | F. arcillo limosa (prueba previa) | | | | | |

| | |
|--|--|
| Código de la Familia | IXC2 |
| Clasificación taxonómica | <i>Xerochrept Calcixeróllico, esquelético arenosa, carbonática, térmica</i> (SSS 1975 y 1996) Calcisol háplico (FAO 1990) |
| Secuencia de horizontes genéticos | Ap-Bk ₁ -Bk ₂ |
| Horizontes diagnóstico | Epipedión Óchrnico y endopedión Cálculo |
| Profundidad de los suelos | Poco profundos |
| Material originario | Depósitos detríticos con gravas poligénicas |
| Clase de drenaje | Drenaje rápido |
| Clase de infiltración | Moderada |
| Conductividad hidráulica | Lenta |
| CRAD | Muy baja |
| Compactación (según densidad aparente) | No presentan problemas para el desarrollo radicular |
| Texturas desde la superficie | Medias a gruesas |
| Elementos gruesos | Abundantes o muy abundantes |
| Localización | Terrazas aluviales |
| Pediones representativos | ML22 |
| Perfil modal | IXC2-P1 |
| Características diferenciales de la Familia: | |
| <p>El horizonte Ap tiene un espesor de 30-40 cm. Es de textura franca, con muy frecuentes elementos gruesos (16-35%). El contenido de carbonatos es de medio a alto (16-40%). Presenta una respuesta muy alta al HCl 11%. La reacción es moderadamente básica o ligeramente alcalina (pH 8.0-8.6).</p> <p>La sección control del perfil (desde el límite inferior del Ap hasta 1 m) la constituye un horizonte con abundantes o muy abundantes elementos gruesos (>36%), y presenta frecuentes acumulaciones de carbonatos (2-20% en volumen) en forma de cemento geopetal. La fracción fina es de textura franco arenosa o arenosa, con un contenido de arcilla del 7-9.5% y de arena de 36-70%. La mineralogía es carbonática. El contenido de carbonatos es muy alto (41-53%). Presenta una reacción moderadamente básica o ligeramente alcalina (pH 8.0-8.8).</p> | |

Perfil modal IXC2-P1

| Horz. genético | Horz. diagnost. | | Prof. Mínima (cm) | PH (1:2.5) | CE (1:5) | CaCO ₃ (%) | Mat. Orgánica (%) | Caliza activa (%) |
|------------------|-----------------|----------|-------------------|-----------------------|----------|-----------------------|-------------------|--------------------------------------|
| Ap | Óchrnico | | 30 | 8.3 | 0.13 | 30.1 | 0.75 | 9.2 |
| Bk1 | Cálculo | | 70 | 8.0 | 0.10 | 41.0 | | |
| Bk2 | Cálculo | | 130 | 8.6 | 0.12 | 53.0 | | |
| Arena gruesa (%) | Arena fina (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | Clase textural (USDA) | | Hdad. -33 kpa | Hdad. -1500 kpa | Densidad aparente kg m ⁻³ |
| 9.1 | 33.5 | 46.3 | 11.1 | Franca | | 17.4 | 17.9 | 1450 |
| 36.3 | 25.2 | 29.3 | 9.2 | Franco arenosa | | 8.9 | 5.9 | |
| 69.3 | 20.5 | 3.2 | 7.0 | Arenosa | | 8.3 | 2.1 | |

| | |
|--|--|
| Código de la Familia | IXC3 |
| Clasificación taxonómica | <i>Xerochrept Calcixeróllico, esquelética franca, mezclada, térmica</i> (SSS 1975 y 1996) <i>Calcisol háplico</i> (FAO 1990) |
| Secuencia de horizontes genéticos | Ap-Bk-C |
| Horizontes diagnóstico | Epipedión Óchrnico y endopedión Cálxico |
| Profundidad de los suelos | Poco profundos |
| Material originario | Detríticos terrígenos con gravas metamórficas |
| Clase de drenaje | Drenaje rápido |
| Clase de infiltración | Moderada |
| Conductividad hidráulica | Moderada |
| CRAD | Muy baja |
| Compactación (según la densidad aparente) | No presentan problemas para el desarrollo radicular en el horizonte Ap |
| Texturas desde la superficie | Moderadamente gruesas a gruesas |
| Elementos gruesos | Abundantes o muy abundantes |
| Localización | Terrazas asociadas cauces secundarios con origen en la zona norte de la Sierra Prelitoral |
| Pediones representativos | PM03 |
| Perfil modal | IXC3-P1 |
| Características diferenciales de la Familia: | |
| <p>El horizonte Ap tiene un espesor de 35 cm. Es de textura franco arenosa, con muy frecuentes elementos gruesos (16-35%). Tiene un contenido de carbonatos medio (16%) y la respuesta al HCl 11% es alta. La reacción es moderadamente básica (pH 8.0).</p> <p>La sección control del perfil (desde el límite inferior del Ap hasta 1m) está constituida por una capa de gravas (>70% de elementos gruesos), que en su parte superior presenta acumulaciones de carbonatos en forma de cemento geopetal. La textura de la fracción fina es franco arenosa o arenosa, con contenidos de arcilla entre 6.5-13.5% y de arena de 62.5-91%. La mineralogía es mezclada, presentando una respuesta muy alta al HCl 11%. El contenido de carbonatos varía entre moderadamente alto (22.5% en la parte superior de la sección control) a muy bajo (1.5-2.5%) en la parte inferior. Presenta una reacción moderadamente básica (pH 7.9-8.1).</p> <p>Por debajo de la sección control aparece un horizonte con gravas, de textura arenosa en la fracción fina, que presenta una baja respuesta al HCl 11%.</p> | |

Perfil modal IXC3-P1

| Horz. genético | Horz. diagnost. | | Prof. Mínima (cm) | PH (1:2.5) | CE (1:5) | CaCO ₃ (%) | Mat. Orgánica (%) | Caliza activa (%) |
|------------------|-----------------|----------|-------------------|-----------------------|---------------|-----------------------|--------------------------------------|-------------------|
| Ap | Óchrnico | | 35 | 8.0 | 0.10 | 16.6 | 0.9 | 5.8 |
| Bk | Cálxico | | 68 | 8.1 | 0.10 | 22.5 | | |
| C | | | 160 | 8.0 | 0.17 | 2.0 | | |
| Arena gruesa (%) | Arena fina (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | Clase textural (USDA) | Hdad. -33 kpa | Hdad. -1500 kpa | Densidad aparente kg m ⁻³ | |
| 25.5 | 31.1 | 30.0 | 13.4 | Franco arenosa | 17.1 | 8.0 | 1450 | |
| 38.5 | 24.0 | 24.2 | 13.3 | Franco arenosa | 16.9 | 9.1 | | |
| 71.2 | 19.9 | 2.3 | 6.6 | Arenosa | 6.9 | 4.9 | | |

| | |
|---|--|
| Código de la Familia | IXC4 |
| Clasificación taxonómica | <i>Xerochrept Calcixeróllico, franca gruesa, carbonática, térmica</i> (SSS 1975 y 1996) <i>Calcisol háplico</i> (FAO 1990) |
| Secuencia de horizontes genéticos | Ap-Bkn |
| Horizontes diagnóstico | Epipedión Óchrnico y endopedión Cálculo |
| Profundidad de los suelos | Poco profundos |
| Material originario | Detríticos terrígenos finos |
| Clase de drenaje | Bien drenados |
| Clase de infiltración | Moderada |
| Conductividad hidráulica | Moderada |
| CRAD | Muy alta |
| Compactación (según densidad aparente) | Generalmente no presentan problemas al desarrollo radicular |
| Texturas desde la superficie | Medias |
| Elementos gruesos | Pocos |
| Localización | Divisoria redondeada del Área de vertientes y barrancos |
| Pediones representativos | PM13 |
| Perfil modal | IXC4-P1 |
| Características diferenciales de la Familia: | |
| <p>El horizonte Ap tiene un espesor de 30-40 cm. Es de textura franco limosa, con pocos elementos gruesos (1-5%). Tienen un alto contenido de carbonatos (43-70%), presentando una respuesta al HCl 11% muy alta. La reacción es moderadamente básica (pH 8.2-8.3).</p> <p>La sección control del perfil (desde el límite inferior del Ap hasta 1 m) está constituida por un horizonte cálcico, que presenta acumulaciones de carbonatos en forma de nódulos muy abundantes (>40% en volumen). Tiene una ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? del 12-13%. La mineralogía es carbonática. El contenido de carbonatos es muy alto (45-80%). La reacción es moderadamente básica (pH 8.3-8.4).</p> | |

Perfil modal IXC4-P1

| Horz. Genético | | Horz. diagnost. | | Prof. Mínima (cm) | PH (1:2.5) | CE (1:5) | CaCO ₃ (%) | Mat. Orgánica (%) | Caliza activa (%) |
|------------------|----------------|-----------------|-------------|-----------------------|------------|---------------|-----------------------|--------------------------------------|-------------------|
| Ap | | Óchrnico | | 40 | 8.2 | | 56.5 | 1.0 | 27.8 |
| Bkn | | Cálculo | | 160 | 8.3 | | 62.5 | | |
| Arena gruesa (%) | Arena fina (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | Clase textural (USDA) | | Hdad. -33 kpa | Hdad. -1500 kpa | Densidad aparente kg m ⁻³ | |
| 6.1 | 15.4 | 63.1 | 15.5 | Franco limosa | | 24.0 | 6.8 | 1415 | |
| 3.0 | 9.5 | 72.6 | 15.0 | Franco limosa | | 28.0 | 6.1 | 1510 | |

| | |
|---|---|
| Código de la Familia | IXC5 |
| Clasificación taxonómica | <i>Xerochrept Calcixeróllico, arenosa, mezclada, térmica</i> (SSS 1975 y 1996) <i>Calcisol háplico</i> (FAO 1990) |
| Secuencia de horizontes genéticos | Ap-Bk |
| Horizontes diagnóstico | Epipedión Óchrico y endopedión Cálculo |
| Profundidad de los suelos | Profundos |
| Material originario | Areniscas incoherentes y conglomerados sin cementar |
| Clase de drenaje | Drenaje rápido |
| Clase de infiltración | Moderada |
| Conductividad hidráulica | Lenta |
| CRAD | Baja |
| Compactación | No presentan problemas al desarrollo radicular |
| Texturas desde la superficie | Moderadamente gruesas a gruesas |
| Elementos gruesos | Pocos |
| Localización | Divisoria (crestas) del Área de vertientes y barrancos |
| Pediones representativos | ML29 |
| Perfil modal | IXC5-P1 |
| Características diferenciales de la Familia: | |
| <p>El horizonte Ap tiene un espesor de 40 cm. Es de textura franco arenosa, con pocos elementos gruesos (1-5%). Tiene un contenido de carbonatos alto (20-30%). Presenta una respuesta muy alta al HCl 11%. La reacción es moderadamente básica (pH 8.1).</p> <p>La sección control del perfil (desde el límite inferior del Ap hasta 1m) está constituida por un horizonte cálcico, que presenta frecuentes acumulaciones (2-20% en volumen) de carbonatos en forma de nódulos y edafotubos. Tiene una textura arenosa. La mineralogía es mezclada, con una muy alta respuesta al HCl 11%. El contenido de carbonatos es moderadamente alto (20-30%). La reacción es moderadamente básica.</p> <p>Por debajo de la sección control suele aparecer un horizonte de gravas sin cementar, que también presenta frecuentes acumulaciones de carbonatos (2-20% en volumen) en forma de nódulos y revistiendo los elementos gruesos.</p> | |

Perfil modal IXC5-P1

| Horz. Genético | Horz. diagnost. | | Prof. Mínima (cm) | PH (1:2.5) | CE (1:5) | CaCO3 (%) | Mat. Orgánica (%) | Caliza activa (%) |
|------------------|-----------------|----------|-------------------|-----------------------|----------|---------------|-------------------|--------------------------------------|
| Ap | Óchrico | | 40 | 8.1 | 0.10 | 22.7 | 1.0 | 7.2 |
| Bk | Cálculo | | 125 | 8.0 | 0.17 | 29.6 | | |
| Arena gruesa (%) | Arena fina (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | Clase textural (USDA) | | Hdad. -33 kpa | Hdad. -1500 kpa | Densidad aparente kg m ⁻³ |
| 27.3 | 38.4 | 22.1 | 12.2 | Franca | | 15.3 | 8.5 | 1480 |
| 60.3 | 30.4 | 3.5 | 5.8 | Arenosa | | 7.0 | 4.3 | |

| | |
|--|---|
| Código de la Familia | IXC6 |
| Clasificación taxonómica | <i>Xerochrept Calcixeróllico, franca gruesa, mezclada, térmica</i> (SSS 1975 y 1996) <i>Calcisol háptico</i> (FAO 1990) |
| Secuencia de horizontes genéticos | Ap-Bkn, Ap-Bkn-Bk, Ap-Bkn-Cr (calclutitas) |
| Horizontes diagnóstico | Epipedión Óchrico y endopedión Cálculo |
| Profundidad de los suelos | Profundos a muy profundos |
| Material originario | Detríticos terrígenos finos con gravas poligénicas |
| Clase de drenaje | Bien drenados |
| Clase de infiltración | Moderadamente lenta |
| Conductividad hidráulica | Lenta |
| CRAD | Moderada a muy alta |
| Compactación (según densidad aparente) | Generalmente no presenta problemas al desarrollo radicular |
| Texturas desde la superficie | Medias a gruesas |
| Elementos gruesos | Pocos a muy abundantes |
| Localización | Vertientes de pendiente suave a moderada |
| Pediones representativos | PM10 (suelos moderadamente profundos), MBC41 (suelos profundos) y PP33 (suelos muy profundos) |
| Perfil modal | IXC6-P1, IXC6-P2 y IXC6-P3 |
| Características diferenciales de la Familia: | |
| <p>El horizonte Ap tiene un espesor de 30-50 cm. Es de textura franca, con pocos elementos gruesos (1-5%). Tiene un contenido de carbonatos de moderadamente alto a alto (22-38%). La respuesta al HCl 11% es muy alta y presenta una reacción moderadamente básica a ligeramente alcalina (pH 7.8-8.7).</p> <p>La sección control del perfil (desde el límite superior del Ap hasta un contacto paralítico a 80 cm o hasta 1 m) está constituida por un horizonte cálcico, que presenta una acumulación secundaria de carbonatos en forma de nódulos y/o cemento geopetal. Tiene un contenido frecuente de elementos gruesos (5-15% por término medio). La textura es franca, con un contenido de arcilla menor del 16% y de arena del 39%. La mineralogía es mezclada y presenta una respuesta al HCl 11% muy alta. El contenido de carbonatos es moderadamente alto o alto (25-39%). Presenta una reacción moderadamente básica (pH 7.9-8.5).</p> <p>Por debajo de este horizonte puede aparecer o bien un horizonte cálcico con elementos gruesos muy abundantes (>70%) y acumulaciones de calcio en forma de cemento geopetal (20-40% en volumen) o bien calclutitas, no salinas (CE 1:5 = 0.16), de textura Franca, con un contenido de carbonatos medio o moderadamente alto (18-29%).</p> | |

Perfil modal IXC6-P1

| Horz. genético | | Horz. diagnost. | | Prof. Mínima (cm) | PH (1:2.5) | CE (1:5) | CaCO ₃ (%) | Mat. Orgánica (%) | Caliza activa (%) |
|------------------|----------------|-----------------|-------------|-----------------------|------------|---------------|-----------------------|--------------------------------------|-------------------|
| Ap | | Óchrico | | 40 | 8.3 | 0.13 | 31.3 | 0.9 | 8.1 |
| Bkn | | Cálculo | | 165 | 8.2 | 0.11 | 34.4 | | |
| Arena gruesa (%) | Arena fina (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | Clase textural (USDA) | | Hdad. -33 kpa | Hdad. -1500 kpa | Densidad aparente kg m ⁻³ | |
| 5.3 | 26.9 | 46.1 | 21.7 | Franca | | 19.7 | 8.2 | 1575 | |
| 3.8 | 35.4 | 44.7 | 16.1 | Franca | | 20.0 | 7.0 | 1555 | |

Perfil modal IXC6-P2

| Horz. genético | | Horz. diagnost. | | Prof. Mínima (cm) | PH (1:2.5) | CE (1:5) | CaCO3 (%) | Mat. Orgánica (%) | Caliza activa (%) |
|------------------|----------------|-----------------|-------------|-----------------------|------------|---------------|-----------------|--------------------------------------|-------------------|
| Ap | | Óchrico | | 40 | 8.3 | 0.13 | 31.3 | 0.9 | 8.1 |
| Bkn | | Cálcico | | 80 | 8.2 | 0.11 | 34.4 | | |
| Cr | | | | 140 | 8.6 | 0.16 | 28.8 | | |
| Arena gruesa (%) | Arena fina (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | Clase textural (USDA) | | Hdad. -33 kpa | Hdad. -1500 kpa | Densidad aparente kg m ⁻³ | |
| 5.3 | 26.9 | 46.1 | 21.7 | Franca | | 19.7 | 8.2 | 1575 | |
| 3.8 | 35.4 | 44.7 | 16.1 | Franca | | 20.0 | 7.0 | 1555 | |
| 7.4 | 36.7 | 36.7 | 19.2 | Franca | | | | | |

Perfil modal IXC6-P3

| Horz. genético | | Horz. diagnost. | | Prof. Mínima (cm) | PH (1:2.5) | CE (1:5) | CaCO3 (%) | Mat. Orgánica (%) | Caliza activa (%) |
|------------------|----------------|-----------------|-------------|-----------------------|------------|---------------|-----------------|--------------------------------------|-------------------|
| Ap | | Óchrico | | 40 | 8.3 | 0.13 | 31.3 | 0.9 | 8.1 |
| Bkn | | Cálcico | | 80 | 8.2 | 0.11 | 34.4 | | |
| Bk | | Cálcico | | 135 | 8.2 | 0.10 | 38.0 | | |
| Arena gruesa (%) | Arena fina (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | Clase textural (USDA) | | Hdad. -33 kpa | Hdad. -1500 kpa | Densidad aparente kg m ⁻³ | |
| 5.3 | 26.9 | 46.1 | 21.7 | Franca | | 19.7 | 8.2 | 1575 | |
| 3.8 | 35.4 | 44.7 | 16.1 | Franca | | 20.0 | 7.0 | 1555 | |
| 65.2 | 23.8 | 6.2 | 4.8 | Arenosa | | 7.0 | 4.3 | | |

| | |
|---|--|
| Código de la Familia | IXC7 |
| Clasificación taxonómica | <i>Xerochrept Calcixeróllico, limosa fina, carbonática, térmica</i> (SSS 1975 y 1996) <i>Calcisol háptico</i> (FAO 1990) |
| Secuencia de horizontes genéticos | Ap-Bkn o Ap-Bkn-Ckn (calcilutitas) |
| Horizontes diagnóstico | Epipedión Óchrnico y endopedión Cálculo |
| Profundidad de los suelos | Profundos o muy profundos |
| Material originario | Detríticos terrígenos finos o calcilutitas |
| Clase de drenaje | Bien drenados |
| Clase de infiltración | Moderada |
| Conductividad hidráulica | Moderada |
| CRAD | Alta o muy alta |
| Compactación (según densidad aparente) | Generalmente no hay problemas para el desarrollo radicular |
| Texturas desde la superficie | Medias a moderadamente finas |
| Elementos gruesos | Pocos |
| Localización | Vertientes de pendiente suave a moderada y divisorias del Área de vertientes y barrancos |
| Pediones representativos | ML25 |
| Perfil modal | IXC7-P1 y IXC7-P2 |
| Características diferenciales de la Familia: | |
| <p>El horizonte Ap tiene un espesor de 40-50 cm. Es de textura franca, con pocos elementos gruesos (1-5%). Su contenido de carbonatos es alto (35-40%), presentando una respuesta muy alta al HCl 11%. La reacción es moderadamente básica o ligeramente alcalina (pH 7.9-8.7).</p> <p>La sección control del perfil (desde el límite superior del Ap hasta un contacto paralítico entre 70-80 cm, o hasta 1 m), está constituida por un horizonte cálcico, que presenta una acumulación secundaria de carbonatos en forma de nódulos (20-40% en volumen). Tiene pocos elementos gruesos (1-5%). La textura el franco arcillo limosa, con contenidos de arcilla del 35% y de arena del 2%. La mineralogía es carbonática. El contenido de carbonatos es muy alto (40-45%). La reacción es moderadamente básica (pH 7.9-8.0). Este horizonte carbonático supone un limitante para la profundidad efectiva del suelo.</p> <p>Como material subyacente puede encontrarse una marga, no salina (CE 1:5 = 0.10), de textura franco arcillo limosa y que presenta frecuentes o abundantes acumulaciones de carbonatos en forma de nódulos (2-40% en volumen). Es de reacción moderadamente básica (pH 8.3).</p> | |

Perfil modal IXC7-P1

| Horz. genético | Horz. diagnost. | | Prof. Mínima (cm) | PH (1:2.5) | CE (1:5) | CaCO ₃ (%) | Mat. Orgánica (%) | Caliza activa (%) |
|------------------|-----------------|----------|-------------------|-----------------------|---------------|-----------------------|--------------------------------------|-------------------|
| Ap | Óchrnico | | 42 | 8.3 | 0.11 | 37.6 | 1.2 | 13.4 |
| Bkn | Cálculo | | 160 | 8.3 | 0.10 | 42.0 | | |
| Arena gruesa (%) | Arena fina (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | Clase textural (USDA) | Hdad. -33 kpa | Hdad. -1500 kpa | Densidad aparente kg m ⁻³ | |
| 7.0 | 29.4 | 44.3 | 19.3 | Franca | 22.4 | 7.9 | 1505 | |
| 0.2 | 1.1 | 63.2 | 35.5 | F.arcillo limosa | 23.0 | 6.3 | 1550 | |

Perfil modal IXC7-P2

| Horz. genético | | Horz. diagnost. | | Prof. Mínima (cm) | PH (1:2.5) | CE (1:5) | CaCO3 (%) | Mat. Orgánica (%) | Caliza activa (%) |
|------------------|----------------|-----------------|-------------|-----------------------|------------|---------------|-----------------|--------------------------------------|-------------------|
| Ap | | Óchrico | | 42 | 8.3 | 0.11 | 37.6 | 1.2 | 13.4 |
| Bkn | | Cálcico | | 90 | 8.3 | 0.10 | 42.0 | | |
| Crkn | | Cálcico | | 90 | 8.3 | 0.10 | 36.6 | | |
| Arena gruesa (%) | Arena fina (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | Clase textural (USDA) | | Hdad. -33 kpa | Hdad. -1500 kpa | Densidad aparente kg m ⁻³ | |
| 7.0 | 29.4 | 44.3 | 19.3 | Franca | | 22.4 | 7.9 | 1505 | |
| 0.2 | 1.1 | 63.2 | 35.5 | F. arcillo limosa | | 23.0 | 6.3 | 1550 | |
| 0.2 | 1.1 | 63.2 | 35.5 | F. arcillo limosa | | | | | |

| | |
|---|--|
| Código de la Familia | IXC9 |
| Clasificación taxonómica | <i>Xerochrept Calcixeróllico, franca gruesa, carbonática, térmica</i> (SSS 1975 y 1996) <i>Calcisol háptico</i> (FAO 1990) |
| Secuencia de horizontes genéticos | Ap-Bkn o Ap-Bkn-Crkn (calclutitas) |
| Horizontes diagnóstico | Epipedión Óchrico, Endopedión Cálculo |
| Profundidad de los suelos | Profundos o muy profundos |
| Material originario | Detríticos terrígenos finos o calclutitas |
| Clase de drenaje | Bien drenados |
| Clase de infiltración | Moderadamente lenta |
| Conductividad hidráulica | Lenta |
| CRAD | Alta o muy alta |
| Compactación (según densidad aparente) | No presentan problemas al desarrollo radicular |
| Texturas desde la superficie | Medias a moderadamente finas |
| Elementos gruesos | Pocos o frecuentes |
| Localización | Divisoria redondeada del Área de relieve suavemente ondulado |
| Pedones representativos | PP36 (suelos muy profundos) y PP 43 (suelos profundos) |
| Perfil modal | IXC9-P1 y IXC9-P2 |
| Características diferenciales de la Familia: | |
| <p>El horizonte Ap tiene un espesor de 30-50 cm. Es de textura franca, con pocos elementos gruesos (1-5%). Tiene un contenido de carbonatos alto o muy alto (31-72%), presentando una respuesta muy alta al HCl 11%. La reacción es moderadamente básica o ligeramente alcalina (pH 7.9-8.7).</p> <p>La sección control del perfil (desde el límite inferior del Ap hasta 1m) está constituida por un horizonte cálcico, que presenta acumulaciones muy abundantes de carbonatos (>40% en volumen) en forma de nódulos y rizoconcrecciones. Es de textura franco limosa, con un contenido de arcilla entre el 10-19% y de arena de 17-38%. El contenido de elementos gruesos es frecuente (5-15%). Tiene un contenido de carbonatos muy alto (42-55% en volumen) y presenta una reacción moderadamente básica o ligeramente alcalina (pH 8.1-8.6).</p> <p>Como material subjacente puede encontrarse una marga no salina (CE 1:5 = 0.10), de textura franco arcillo limosa y que presenta acumulaciones de carbonatos en forma de nódulos muy abundantes (>40% en volumen). Su reacción es moderadamente básica (pH 8.3).</p> | |

Perfil modal IXC9-P1

| Horz. genético | Horz. diagnost. | | Prof. Mínima (cm) | PH (1:2.5) | CE (1:5) | CaCO ₃ (%) | Mat. Orgánica (%) | Caliza activa (%) |
|------------------|-----------------|----------|-------------------|-----------------------|----------|-----------------------|-------------------|--------------------------------------|
| Ap | Óchrico | | 35 | 8.2 | 0.12 | 50.1 | 0.9 | 16.3 |
| Bkn | Cálculo | | 165 | 8.4 | 0.11 | 51.2 | | |
| Arena gruesa (%) | Arena fina (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | Clase textural (USDA) | | Hdad. -33 kpa | Hdad. -1500 kpa | Densidad aparente kg m ⁻³ |
| 9.3 | 30.3 | 44.0 | 16.4 | Franca | | 19.3 | 7.8 | 1325 |
| 2.4 | 20.3 | 61.0 | 16.3 | Franco limosa | | 25.6 | 7.4 | 1450 |

Perfil modal IXC9-P2

| Horz. genético | | Horz. diagnost. | | Prof. Mínima (cm) | PH (1:2.5) | CE (1:5) | CaCO3 (%) | Mat. Orgánica (%) | Caliza activa (%) |
|------------------|----------------|-----------------|-------------|-----------------------------------|------------|---------------|-----------------|--------------------------------------|-------------------|
| Ap | | Óchrico | | 35 | 8.2 | 0.12 | 50.1 | 0.9 | 16.3 |
| Bkn | | Cálcico | | 165 | 8.4 | 0.11 | 51.2 | | |
| Crkn | | | | XXX | 8.3 | 0.10 | | | |
| Arena gruesa (%) | Arena fina (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | Clase textural (USDA) | | Hdad. -33 kpa | Hdad. -1500 kpa | Densidad aparente kg m ⁻³ | |
| 9.3 | 30.3 | 44.0 | 16.4 | Franca | | 19.3 | 7.8 | 1325 | |
| 2.4 | 20.3 | 61.0 | 16.3 | Franco limosa | | 25.6 | 7.4 | 1450 | |
| | | | | F. arcillo limosa (prueba previa) | | | | | |

| | |
|---|--|
| Código de la Familia | IXT1 |
| Clasificación taxonómica | <i>Xerochrept Típico, franca gruesa, mezclada (no ácida), térmica</i> (SSS 1975 y 1996) <i>Cambisol éútrico</i> (FAO 1990) |
| Secuencia de horizontes genéticos | Ap-Bw-C |
| Horizontes diagnóstico | Epipedión Óchrico y endopedión Cámbico |
| Profundidad de los suelos | Moderadamente profundos o profundos |
| Material originario | Detríticos terrígenos finos con gravas metamórficas |
| Clase de drenaje | Bien drenados |
| Clase de infiltración | Moderada |
| Conductividad hidráulica | Lenta |
| CRAD | Alta |
| Compactación (según densidad aparente) | Pueden presentar problemas para el desarrollo radicular a partir del horizonte de laboreo |
| Texturas desde la superficie | Moderadamente gruesas a medias |
| Elementos gruesos | Muy frecuentes |
| Localización | Vertientes de pendiente suave en el Área de pie de monte en las zonas adosadas al zócalo paleozoico |
| Pediones representativos | PM01 |
| Perfil modal | IXT1-P1 |
| Características diferenciales de la Familia: | |
| <p>El horizonte Ap tiene un espesor de 40-50 cm, con una textura franco arenosa, con elementos gruesos muy frecuentes (16-35%). El contenido de carbonatos es muy bajo (1-5%), con una respuesta baja al HCl 11%. La reacción es moderadamente básica (pH 8.0-8.2).</p> <p>La sección control del perfil (desde el límite inferior del Ap hasta 1 m) la constituye un horizonte cámbico, que presenta evidencias de alteración por la presencia de estructura edáfica diferente al material original. Es de textura franca, con un contenido de arcilla de 10-15% y con de arena de 27-51% y con elementos gruesos muy frecuentes (16-35%). La mineralogía es mezclada y presenta una respuesta prácticamente nula al HCl 11%. Tiene un contenido de carbonatos muy bajo o nulo (0.1-0.8%). La reacción es moderadamente básica.</p> <p>El material subyacente lo constituyen materiales detríticos terrígenos con gravas metamórficas, sin estructura debido a la abundancia de elementos gruesos. Su textura es franca y el contenido de carbonatos es nulo (0.1%).</p> | |

Perfil modal IXT1-P1

| Horz. genético | Horz. diagnost. | | Prof. Mínima (cm) | PH (1:2.5) | CE (1:5) | CaCO ₃ (%) | Mat. Orgánica (%) | Caliza activa (%) |
|------------------|-----------------|----------|-------------------|-----------------------|----------|-----------------------|-------------------|--------------------------------------|
| Ap | Óchrico | | 40 | 8.1 | 0.16 | 3.0 | 1.0 | 2.0 |
| Bw | Cámbico | | 90 | 8.1 | 0.24 | 0.4 | | |
| C | | | 170 | 8.1 | 0.22 | 0.1 | | |
| Arena gruesa (%) | Arena fina (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | Clase textural (USDA) | | Hdad. -33 kpa | Hdad. -1500 kpa | Densidad aparente kg m ⁻³ |
| 25.3 | 28.0 | 36.5 | 10.3 | Franco arenosa | | 23.0 | 9.6 | 1470 |
| 16.5 | 23.6 | 47.1 | 12.8 | Franca | | 24.6 | 10.3 | 1755 |
| 21.9 | 27.2 | 41.0 | 9.9 | Franca | | 24.0 | 9.6 | 1790 |

| | |
|---|---|
| Código de la Familia | IXA1 |
| Clasificación taxonómica | <i>Xerochrept Acuico, franca gruesa, mezclada (calcárea), térmica</i> (SSS 1975 y 1996) <i>Calcisol gleyi-háplico</i> (FAO 1990) |
| Secuencia de horizontes genéticos | Ap-Bkn-Bkng |
| Horizontes diagnóstico | Epipedión Óchrnico y endopedión Cálculo |
| Profundidad de los suelos | Profundos |
| Material originario | Detríticos terrígenos finos |
| Clase de drenaje | Moderadamente bien drenados |
| Clase de infiltración | Moderadamente lenta |
| Conductividad hidráulica | Lenta |
| CRAD | Moderada |
| Compactación (según densidad aparente) | Generalmente no presentan problemas al desarrollo radicular |
| Texturas desde la superficie | Moderadamente gruesas |
| Elementos gruesos | Muy pocos |
| Localización | Partes bajas de vertientes con pendiente suave en el Área de relieve suavemente ondulado |
| Pediones representativos | PP53 |
| Perfil modal | IXA1-P1 |
| Características diferenciales de la Familia: | |
| <p>El horizonte Ap tiene un espesor de 30-40 cm, es de textura franco arenosa, con muy pocos elementos gruesos (<1%). Tiene un contenido de carbonatos moderadamente alto (20-30%), presentando una respuesta muy alta al HCl 11%. La reacción es moderadamente básica.</p> <p>La sección control del perfil (desde el límite inferior del Ap hasta 1 m) la constituye un horizonte que presenta frecuentes acumulaciones secundarias de carbonatos en forma de nódulos (2-20% en volumen). A partir de los 70 cm de profundidad presenta moteado frecuente (2-20%) con croma 2. Es de textura franco arenosa, con un contenido de arcilla del 15% y de arena de 54%. Tiene muy pocos elementos gruesos (<1%). La mineralogía es mezclada, presentando una respuesta al HCl 11% muy alta. El contenido de carbonatos totales es moderadamente alto (27%) y la reacción es moderadamente básica (pH 8.3).</p> <p>El material subyacente es de textura franco arcillo limosa, y presenta abundantes manchas (20-50%). La respuesta al HCl 11% es muy alta, con un contenido de carbonatos alto (32.5%). La reacción es ligeramente alcalina (pH 8.7).</p> | |

Perfil modal IXA1-P1

| Horz. genético | Horz. diagnost. | | Prof. Mínima (cm) | PH (1:2.5) | CE (1:5) | CaCO ₃ (%) | Mat. Orgánica (%) | Caliza activa (%) |
|------------------|-----------------|----------|-------------------|-----------------------|---------------|-----------------------|--------------------------------------|-------------------|
| Ap | Óchrnico | | 35 | 8.2 | 0.12 | 20.4 | 0.7 | 4.9 |
| Bkn | Cálculo | | 70 | 8.3 | 0.10 | 27.2 | | |
| Bkng | Cálculo | | 110 | 8.3 | 0.12 | 27.2 | | |
| Cg | | | 140 | 8.7 | 0.23 | 32.5 | | |
| Arena gruesa (%) | Arena fina (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | Clase textural (USDA) | Hdad. -33 kpa | Hdad. -1500 kpa | Densidad aparente kg m ⁻³ | |
| 7.0 | 50.9 | 27.7 | 14.8 | Franco arenosa | 17.0 | 7.8 | 1570 | |
| 3.9 | 50.0 | 31.7 | 14.5 | Franco arenosa | 16.7 | 8.9 | 1490 | |
| 6.7 | 46.9 | 31.7 | 14.7 | Franco arenosa | 17.3 | 9.2 | 1490 | |
| 2.3 | 6.9 | 61.7 | 29.1 | F. arcillo limosa | | | | |

| | |
|---|--|
| Código de la Familia | EXF1 |
| Clasificación taxonómica | <i>Xerofluvent Típico, limosa fina, mezclada (calcárea), térmica</i> (SSS 1975 y 1996) <i>Fluvisol calcáreo</i> (FAO 1990) |
| Secuencia de horizontes genéticos | Ap-Bw |
| Horizontes diagnóstico | Epipedión Óchrico |
| Profundidad de los suelos | Muy profundos |
| Material originario | Detríticos terrígenos finos |
| Clase de drenaje | Bien drenados |
| Clase de infiltración | Moderada |
| Conductividad hidráulica | Lenta |
| CRAD | Muy alta |
| Compactación (según densidad aparente) | Generalmente no presentan problemas para el desarrollo radicular, ni en el horizonte Ap ni en profundidad |
| Texturas desde la superficie | Medias a moderadamente finas |
| Elementos gruesos | Pocos |
| Localización | Partes bajas de vertientes de pendiente suave, fondos de valle y llanuras aluviales |
| Pediones representativos | TL63 |
| Perfil modal | EXF1-P1 |
| Características diferenciales de la Familia: | |
| <p>El horizonte Ap tiene un espesor de 30-50 cm, es de textura franco limosa y con pocos elementos gruesos. El contenido de carbonatos es moderadamente alto o alto (20-36%), la respuesta al HCl 11% es muy alta y la reacción es moderadamente básica (pH 8.2-8.4).</p> <p>La sección control del perfil (desde el límite inferior del Ap hasta 1 m) se corresponde básicamente con el horizonte Bw. Es de texturas franco limosas o franco arcillo limosas, con un contenido de arcilla entre 24-34%. La mineralogía es mezclada, con un contenido de carbonatos moderadamente alto o alto (20-37%). La respuesta al HCl 11% es muy alta y la reacción es moderadamente básica o ligeramente alcalina (pH 8.3-8.6). Estos suelos presentan carácter fluvéntico (distribución irregular de la materia orgánica en profundidad).</p> | |

Perfil modal EXF1-P1

| Horz. genético | Horz. diagnost. | | Prof. Mínima (cm) | PH (1:2.5) | CE (1:5) | CaCO3 (%) | Mat. Orgánica (%) | Caliza activa (%) |
|------------------|-----------------|----------|-------------------|-----------------------|----------|---------------|-------------------|--------------------------------------|
| Ap | Óchrico | | 42 | 8.3 | 0.16 | 28.0 | 0.7 | |
| Bw | | | 165 | 8.4 | 0.15 | 28.5 | | |
| Arena gruesa (%) | Arena fina (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | Clase textural (USDA) | | Hdad. -33 kpa | Hdad. -1500 kpa | Densidad aparente kg m ⁻³ |
| 4.1 | 17.6 | 58.6 | 19.7 | Franco limosa | | 21.2 | 8.3 | 1570 |
| 2.1 | 10.7 | 57.6 | 29.6 | F. arcillo limosa | | 23.8 | 6.2 | 1370 |

| | |
|---|--|
| Código de la Familia | EXF3 |
| Clasificación taxonómica | <i>Xerofluvent Típico, franca gruesa, mezclada (calcárea), térmica</i> (SSS 1975 y 1996) <i>Fluvisol calcáreo</i> (FAO 1990) |
| Secuencia de horizontes genéticos | Ap-Bw |
| Horizontes diagnóstico | Epipedión Óchrico |
| Profundidad de los suelos | Muy profundos |
| Material originario | Detríticos terrígenos finos |
| Clase de drenaje | Bien drenados |
| Clase de infiltración | Moderadamente lenta |
| Conductividad hidráulica | Lenta |
| CRAD | Muy alta |
| Compactación (según la densidad aparente) | Generalmente no presentan problemas de desarrollo radicular en el horizonte superficial aunque lo pueden presentar en profundidad |
| Texturas desde la superficie | Medias |
| Elementos gruesos | Pocos |
| Localización | Partes bajas de vertientes de pendiente suave, fondos de valle y llanuras aluviales |
| Pediones representativos | PP40 |
| Perfil modal | EXF3-P1 |
| Características diferenciales de la Familia: | |
| <p>El horizonte Ap tiene un espesor de 30-50 cm, es de textura franca, con pocos elementos gruesos (1-5%). El contenido de carbonatos es moderadamente alto o alto (20-35%), presentando una respuesta al HCl 11% muy alta. La reacción es moderadamente básica (pH 7.9-8.1).</p> <p>La sección control del perfil (desde el límite inferior del Ap hasta 1 m) se corresponde con el horizonte Bw. Es de texturas francas, con un contenido de arcilla entre 14-17% y de arena del 38-44%. La mineralogía es mezclada, con un contenido de carbonatos moderadamente alto o alto (23-35%). La respuesta al HCl 11% es muy alta. La reacción es moderadamente básica o ligeramente alcalina (pH 8.2-8.6). Estos suelos presentan carácter fluvéntico (contenido de 0.36% de carbono orgánico a 125 cm).</p> | |

Perfil modal EXF3-P1

| Horz. Genético | Horz. diagnost. | | Prof. Mínima (cm) | PH (1:2.5) | CE (1:5) | CaCO3 (%) | Mat. Orgánica (%) | Caliza activa (%) |
|------------------|-----------------|----------|-------------------|-----------------------|---------------|-----------------|--------------------------------------|-------------------|
| Ap | Óchrico | | 44 | 8.0 | 0.16 | 27.5 | 1.2 | 7.6 |
| Bw | | | 150 | 8.4 | 0.19 | 28.0 | 0.13 | 28.0 |
| Arena gruesa (%) | Arena fina (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | Clase textural (USDA) | Hdad. -33 kpa | Hdad. -1500 kpa | Densidad aparente kg m ⁻³ | |
| 4.7 | 27.9 | 49.4 | 18.0 | Franca | 20.6 | 7.8 | 1575 | |
| 3.4 | 37.6 | 43.8 | 15.2 | Franca | 21.4 | 7.9 | 1620 | |

| | |
|--|--|
| Código de la Familia | EXT1 |
| Clasificación taxonómica | <i>Xeorthent Típico, limosa, mezclada (calcárea), térmica, superficial</i> (SSS 1975 y 1996) <i>Regosol calcáreo</i> (FAO 1990) |
| Secuencia de horizontes genéticos | Ap-Cr (calclutitas) |
| Horizontes diagnóstico | Epipedión Óchrico |
| Profundidad de los suelos | Poco profundos |
| Material originario | Calclutitas |
| Clase de drenaje | Drenaje rápido |
| Clase de infiltración | Moderadamente lenta |
| Conductividad hidráulica | Moderada |
| CRAD | Baja |
| Compactación (según densidad aparente) | Pueden presentar problemas al desarrollo radicular por la alta compactación del horizonte superficial |
| Texturas desde la superficie | Moderadamente finas |
| Elementos gruesos | Pocos |
| Localización | Vertientes de pendiente suave a moderada en el Área de vertientes y barrancos |
| Pediones representativos | PM09 y ML32 |
| Perfil modal | EXT1-P1 |
| Características diferenciales de la Familia: | |
| <p>La sección control se limita al horizonte A, que limita con el C mediante un contacto paralítico a menos de 50 cm desde la superficie. Es de textura franco arcillo limosa, con un contenido de arcilla entre 27-31%). Tiene pocos elementos gruesos (1-5%). La mineralogía es mezclada, con un contenido de carbonatos de mediano a alto (15-40%), la respuesta al HCl 11% es muy alta. La reacción es moderadamente básica o ligeramente alcalina (pH 8.3-8.7).</p> <p>El horizonte subjacente son calclutitas, ligeramente salinas (CE 1:5 0.33), con un contenido de carbonatos de mediano a muy alto (15-50%) y de reacción ligeramente alcalina (pH 8.6-9.0).</p> | |

Perfil modal EXT1-P1

| Horz. genético | Horz. diagnost. | | Prof. Mínima (cm) | PH (1:2.5) | CE (1:5) | CaCO ₃ (%) | Mat. Orgánica (%) | Caliza activa (%) |
|------------------|-----------------|----------|-------------------|-----------------------|---------------|-----------------------|--------------------------------------|-------------------|
| Ap | Óchrico | | 35 | 8.5 | 0.18 | 32.0 | 1.2 | 12.1 |
| C | | | 132 | 8.8 | 0.33 | 30.0 | | |
| Arena gruesa (%) | Arena fina (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | Clase textural (USDA) | Hdad. -33 kpa | Hdad. -1500 kpa | Densidad aparente kg m ⁻³ | |
| 1.5 | 12.3 | 58.6 | 27.6 | F. arcillo limosa | 25.8 | 12.1 | 1725 | |
| 0.6 | 5.2 | 63.4 | 30.8 | F. arcillo limosa | | | | |

| | |
|---|--|
| Código de la Familia | EXT2 |
| Clasificación taxonómica | <i>Xerorthent Típico, franca, mezclada (calcárea), térmica, superficial</i> (SSS 1975 y 1996) <i>Regosol calcáreo</i> (FAO 1990) |
| Secuencia de horizontes genéticos | Ap-Cr (calcilutitas) |
| Horizontes diagnóstico | Epipedión Óchrico |
| Profundidad de los suelos | Poco o moderadamente profundos |
| Material originario | Calcilutitas y areniscas incoherentes |
| Clase de drenaje | Drenaje rápido |
| Clase de infiltración | Moderadamente lenta |
| Conductividad hidráulica | Lenta |
| CRAD | Baja |
| Compactación (según densidad aparente) | Generalmente no presentan problemas al desarrollo radicular |
| Texturas desde la superficie | Medias o moderadamente gruesas |
| Elementos gruesos | Pocos o muy pocos |
| Localización | Vertientes de pendiente suave en el Área de relieve suavemente ondulado y vertientes de pendiente moderada a fuerte en el Área de vertientes y barrancos |
| Pediones representativos | PP47 |
| Perfil modal | EXT2-P1 |
| Características diferenciales de la Familia: | |
| <p>La sección control se limita al horizonte A, que limita con el C mediante un contacto paralítico a menos de 50 cm desde la superficie. Es de textura franca o franco arenosa, con un contenido de arcilla menor del 18%. Tiene pocos o muy pocos elementos gruesos (1-5%). La mineralogía es mezclada, presentando una respuesta muy alta al HCl 11%. El contenido de carbonatos totales es moderadamente alto (20-30%). La reacción es moderadamente básica (pH 8.0-8.4).</p> <p>El horizonte subyacente son típicamente calcilutitas, no salinas, con un contenido de carbonatos alto o muy alto (35-60%). La reacción es moderadamente básica (pH 8.2-8.4).</p> | |

Perfil modal EXT2-P1

| Horz. Genético | Horz. diagnost. | | Prof. Mínima (cm) | PH (1:2.5) | CE (1:5) | CaCO ₃ (%) | Mat. Orgánica (%) | Caliza activa (%) |
|------------------|-----------------|----------|-------------------|-----------------------|----------|-----------------------|-------------------|--------------------------------------|
| Ap | Óchrico | | 40 | 8.0 | 0.16 | 28.0 | 1.2 | 8.0 |
| C | | | 125 | 8.4 | 0.18 | 35.0 | | |
| Arena gruesa (%) | Arena fina (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | Clase textural (USDA) | | Hdad. -33 kpa | Hdad. -1500 kpa | Densidad aparente kg m ⁻³ |
| 3.2 | 40.1 | 42.1 | 14.6 | Franca | | 20.8 | 7.8 | 1515 |
| 25.0 | 29.7 | 32.2 | 13.1 | Franco arenosa | | | | |

| | |
|--|---|
| Código de la Familia | EXL1 |
| Clasificación taxonómica | <i>Xerorthent Lítico, franca, mezclada (no ácida), térmica, superficial</i> (SSS 1975 y 1996) <i>Regosol Eútrico</i> (FAO 1990) |
| Secuencia de horizontes genéticos | A-R |
| Horizontes diagnóstico | Epipedión Óchrico |
| Profundidad de los suelos | Poco profundos |
| Material originario | Esquistos y cuarcitas |
| Clase de drenaje | Drenaje rápido |
| Clase de infiltración | Moderadamente lenta |
| Conductividad hidráulica | Moderada |
| CRAD | Muy baja |
| Compactación (según densidad aparente) | No presenta problemas para el desarrollo radicular |
| Texturas desde la superficie | Medias |
| Elementos gruesos | Abundantes |
| Localización | Vertientes escarpadas o muy escarpadas del Área de montaña (Sierra Prelitoral) |
| Pediones representativos | SP1 |
| Pefil modal | EXL1-P1 y EXL2-P2 |
| Características diferenciales de la Familia: | |
| <p>La sección control se limita la horizonte A, que limita con el R mediante un contacto lítico a menos de 50 cm desde la superficie. Es de textura franca, con un contenido de arcilla entre el 18-35%. Tiene abundantes elementos gruesos (36-70%). La mineralogía es mezclada y no presenta respuesta al HCl 11%. La reacción es medianamente básica (pH 7.4-7.8).</p> <p>El horizonte subyacente son rocas: esquistos y/o cuarcitas.</p> | |

Perfil modal EXL1-P1

| Horz. genético | Horz. Diagnost. | | Prof. Mínima (cm) | PH (1:2.5) | CE (1:5) | CaCO3 (%) | Mat. Orgánica (%) | Caliza activa (%) |
|------------------|-----------------|----------|-------------------|-----------------------|----------|---------------|-------------------|--------------------------------------|
| Ap | Óchrico | | 35 | 7.4 | 0.14 | 1.0 | 4.6 | |
| R | | | 100 | | | | | |
| Arena gruesa (%) | Arena fina (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | Clase textural (USDA) | | Hdad. -33 kpa | Hdad. -1500 kpa | Densidad aparente kg m ⁻³ |
| 20.3 | 17.2 | 38.1 | 26.1 | Franca | | 21.0 | 8.0 | 1350 |

| | |
|---|---|
| Código de la Familia | EXL2 |
| Clasificación taxonómica | <i>Xerorthent Lítico, franca, mezclada (calcárea), térmica, superficial</i> SSS (1975, 1996) <i>Regosol calcáreo</i> (FAO 1990) |
| Secuencia de horizontes genéticos | A-R |
| Horizontes diagnóstico | Epipedión Óchrico |
| Profundidad de los suelos | Poco profundos |
| Material originario | Calizas y dolomías |
| Clase de drenaje | Drenaje rápido |
| Clase de infiltración | Moderadamente lenta |
| Conductividad hidráulica | Moderada |
| CRAD | Muy baja |
| Compactación (según densidad aparente) | No presenta problemas al desarrollo radicular |
| Texturas desde la superficie | Medias |
| Elementos gruesos | Frecuentes |
| Localización | Vertientes escarpadas o muy escarpadas del Área de montaña (Sierra Prelitoral) |
| Pediones representativos | |
| Perfil modal | EXL2-P1 |
| Características diferenciales de la Familia: | |
| <p>La sección control se limita al horizonte A, que limita con el R por medio de un contacto lítico a menos de 50 cm desde la superficie. Es de textura franca, con un contenido de arcilla entre el 18-25%. Tiene frecuentes elementos gruesos (5-15%). La mineralogía es mezclada y presenta una alta respuesta al HCl 11%. La reacción es moderadamente básica (pH 7.9-8.4).</p> <p>El horizonte subyacente son rocas calizas.</p> | |

Perfil modal EXL2-P1

| Horz. genético | | Horz. Diagnost. | | Prof. Mínima (cm) | PH (1:2.5) | CE (1:5) | CaCO ₃ (%) | Mat. Orgánica (%) | Caliza activa (%) |
|------------------|----------------|-----------------|-------------|-----------------------|------------|---------------|-----------------------|--------------------------------------|-------------------|
| Ap | | Óchrico | | 40 | 8.0 | 0.12 | 22.5 | 4.0 | |
| R | | | | 120 | | | | | |
| Arena gruesa (%) | Arena fina (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | Clase textural (USDA) | | Hdad. -33 kpa | Hdad. -1500 kpa | Densidad aparente kg m ⁻³ | |
| 2.3 | 20.5 | 58.0 | 19.2 | Franca | | 23.8 | 12.7 | 1380 | |
| | | | | | | | | | |

Anejo 2

Modelo conceptual, definición del modelo interno y diccionario de la base de datos de suelos del Sistema de Información de Suelos.

1. Modelo conceptual y definición del modelo interno de la base de datos del Sistema de Información de Suelos.

Tabla SUELOS.PAT (Delineaciones de las unidades cartográficas. Está conectada con la componente geométrica de la base de datos espacial de suelos).

| Atributo | Tipo | Anchura | Decimales | Descripción |
|-------------|------|---------|-----------|---|
| AREA | N | 11 | 0 | Superficie (m ²) de cada delineación de suelos perteneciente a una unidad cartográfica. |
| PERIMETRO | N | 11 | 0 | Perímetro (m) de cada delineación de suelos perteneciente a una unidad cartográfica. |
| >>SUELOS# | N | 11 | 0 | Identificador interno asignado a cada delineación o polígono por el SIG al crear la topología de la cobertura. Actúa como identificador clave de la entidad delineación. |
| <<SUELOS_ID | N | 11 | 0 | Identificador asignado por el usuario que representa la unidad cartográfica a la que pertenece la delineación de suelos. Puede actuar como identificador externo a la entidad delineación. |
| <<CODIGO | C | 4 | | Identificador asignado por el usuario que representa la unidad cartográfica a la que pertenece la delineación de suelos. Actúa como identificador externo a la entidad delineación para establecer la relación con la entidad UC (Unidad Cartográfica). |

Tabla UC.DBF (Unidades cartográficas. Contiene la información temática asociada a las unidades cartográficas de suelos).

| Atributo | Tipo | Anchura | Decimales | Descripción |
|------------|------|---------|-----------|---|
| >>CODIGO | C | 4 | | Identificador clave de la entidad UC. Representa el código de cada unidad cartográfica. |
| <TIPO | C | 3 | | Tipo de unidad cartográfica según su pureza en cuanto a componentes de suelos: consociación, asociación, complejo o área miscelánea. |
| <TEXTURA | C | A | | Fase de textura del horizonte superficial de la unidad cartográfica. |
| PENDIENTE | | | | Fase de pendiente de la unidad cartográfica. |
| <LITOLOGIA | C | 5 | | Material originario de los suelos que componen la unidad cartográfica. |
| <<GEOFORMA | C | 3 | | Geoforma donde se encuentra enclavada la unidad cartográfica de suelos. Actúa como identificador externo a la entidad UC para establecer la relación con la entidad GEOFORMA. |

Tabla GEOFORMA.DBF (Geoformas)

| Atributo | Tipo | Anchura | Decimales | Descripción |
|------------|------|---------|-----------|--|
| >>GEOFORMA | C | 3 | | Representa el código de cada geoforma en la que se subdividen las unidades de paisaje. |
| DESCRIPCIO | C | 105 | | Descripción de la geoforma. |
| <<PAISAJE | C | 1 | | Código que representa la unidad de paisaje en la que se encuentra la geoforma |

Tabla PERFIL.DBF (Perfiles modales. Contiene la información temática relativa a los perfiles modales que representan las familias de suelos).

| Atributo | Tipo | Anchura | Decimales | Descripción |
|-------------|------|---------|-----------|--|
| >>PERFIL | C | 7 | | Identificador clave de la entidad PERFIL. |
| MATORIG | C | 5 | | Material originario a partir del cual se han desarrollado los suelos que representa el perfil modal. |
| CDRENAJE | C | 30 | | Clase de drenaje del perfil modal según el criterio CatSIS (Boixadera <i>et al.</i> 1989). |
| CINFILTRA | C | 20 | | Clase de infiltración del perfil modal según criterio de Landon (1984). |
| CCONDHIDRA | C | 25 | | Clase de conductividad hidráulica según Landon (1984). |
| CCRAD | C | 15 | | Clase de Capacidad de Retención de Agua Disponible según el criterio CatSIS (Boixadera <i>et al.</i> 1989, SCS 1983). |
| ESTESTR | C | 10 | | Estabilidad estructural del horizonte superficial del perfil. |
| <LIMITAPROF | C | 5 | | Tipo de limitación al desarrollo radicular que presenta el perfil. |
| LIMITEPROF | N | 3 | 0 | Profundidad desde la superficie del suelo a la que aparece la capa u horizonte limitante. |
| CPROFUND | C | 25 | | Clase de profundidad efectiva del suelo según el criterio CatSIS (Boixadera <i>et al.</i> 1989). |
| SECHORIZON | C | 15 | | Secuencia de horizontes genéticos del perfil modal (nomenclatura SSS 1994). |
| <<TAXA | C | 4 | | Clase taxonomica (familia) a la que pertenece el perfil modal. Actúa como identificador externo a la entidad PERFIL para establecer la relación con la entidad TAXA. |

Tabla UCPERFIL.DBF (Relación entre unidades cartográficas y perfiles modales).

| Atributo | Tipo | Anchura | Decimales | Descripción |
|------------|------|---------|-----------|---|
| <<>>CODIGO | C | 4 | | Componente del identificador clave de la entidad UCPERFIL. Representa el código de cada unidad cartográfica. Actúa también como identificador externo para establecer la relación con la entidad UC. |
| <<>>PERFIL | C | 7 | | Componente del identificador clave de la entidad UCPERFIL. Representa el código de cada perfil que se relaciona con un miembro de UC. Actúa también como identificador externo para establecer la relación con la entidad PERFIL. |
| PORCENTAJE | N | 3 | 0 | Porcentaje de un determinado componente de suelos en una unidad cartográfica. |
| <SITUACION | C | 3 | | Patrón de distribución de un determinado componente de suelos en una unidad cartográfica. |
| <RELACION | C | 3 | | Tipo de relación del componente de suelos en la unidad cartográfica: componente principal o inclusión. |

Tabla TAXA.DBF (Clasificación taxonómica a nivel de familia de los perfiles modales).

| Atributo | Tipo | Anchura | Decimales | Descripción |
|-----------|------|---------|-----------|---|
| >>TAXA | C | 4 | | Identificador clave de la familia de suelos. |
| GGRUPO | C | 15 | | Gran grupo al que pertenece el perfil modal de suelos según Soil Taxonomy (SSS 1975 y 1996). |
| SGRUPO | C | 15 | | Subgrupo al que pertenece el perfil modal de suelos según Soil Taxonomy (SSS 1975 y 1996). |
| CTEXTURAL | C | 20 | | Clase de partículas del perfil modal de suelos según Soil Taxonomy (SSS 1975 y 1996). |
| CMINERAL | C | 15 | | Clase mineralógica del perfil modal de suelos según Soil Taxonomy (SSS 1975 y 1996). |
| REACCION | C | 15 | | Clase de reacción del perfil modal de suelos según Soil Taxonomy (SSS 1975 y 1996). |
| CTEMP | C | 11 | | Clase de temperatura del perfil modal de suelos según Soil Taxonomy (SSS 1975 y 1996). |
| CPROF | C | 11 | | Clase de profundidad del perfil modal de suelos según Soil Taxonomy (SSS 1975 y 1996). |
| FAO1990 | C | 20 | | Clase a la que pertenece el perfil modal según el sistema de clasificación de la FAO-Unesco (FAO 1990). |

Tabla HORIZON.DBF (Descripción de los horizontes de los perfiles modales).

| Atributo | Tipo | Anchura | Decimales | Descripción |
|-------------|------|---------|-----------|--|
| >>HORIZONTE | C | 15 | | Identificador clave del horizonte. |
| <<PERFIL | C | 7 | | Identificador del perfil al que pertenece el horizonte. Actúa como identificador externo a la entidad HORIZONTE para establecer la relación con la entidad PERFIL. |
| HORIZGEN | C | 5 | | Clase de horizonte genético, nomenclatura SSS (1994). |
| HORIZDIAG | C | 15 | | Clase de horizonte diagnóstico según Soil Taxonomy (SSS 1975 y 1996). |
| PROFMIN | N | 3 | 0 | Profundidad del límite superior del horizonte (cm). |
| PROFMAX | N | 3 | | Profundidad del límite inferior del horizonte (cm). |
| ESPESOR | N | 3 | 0 | Espesor del horizonte (cm). |
| COLOR | C | 9 | | Color del horizonte (tablas Munsell). |
| MANCHASP | C | 5 | | Porcentaje de manchas que aparecen en el horizonte. |
| MANCHAST | C | 5 | | Tamaño de las manchas que aparecen en el horizonte (rango en mm). |
| MANCHASC | C | 9 | | Color de las manchas que aparecen en el horizonte (tablas Munsell). |
| ELGRUESOS | C | 5 | | Porcentaje de elementos gruesos que aparecen en el horizonte (criterio SINEDARES, CatSIS). |
| <TEXTURA | C | 4 | | Clase de textura USDA. |
| AREGRUESA | N | 4 | 1 | Porcentaje de Arena gruesa USDA. |
| AREFINA | N | 4 | 1 | Porcentaje de Arena fina USDA. |
| LIMO | N | 4 | 1 | Porcentaje de Limo USDA. |
| ARCILLA | N | 4 | 1 | Porcentaje de Arcilla USDA. |
| ESTRCGRADO | C | 17 | | Grado de desarrollo de la estructura. |
| ESTRCFORMA | C | 20 | | Forma de los agregados. |
| ESTRCTAMA | C | 10 | | Tamaño de los agregados. |

Tabla HORIZON.DBF (Descripción de los horizontes de los perfiles modales),
(continuación).

| | | | | |
|------------|---|----|---|--|
| COMPACIDAD | C | 15 | | Grado de compacidad (criterio SINEDARES, CatSIS). |
| FRIABILIDA | C | 15 | | Grado de friabilidad (criterio SINEDARES, CatSIS). |
| CEMENTAC | C | 15 | | Grado de cementación del horizonte (criterio SINEDARES, CatSIS). |
| HCL | C | 10 | | Grado de reacción al HCl 11% (criterio SINEDARES, CatSIS). |
| REVEST | C | 5 | | Proporción de revestimientos en el horizonte (criterio SINEDARES, CatSIS). |
| REVESTIPO | C | 10 | | Tipo de revestimientos |
| ACUMAL | C | 5 | | Porcentaje acumulaciones. |
| ACUMFORMA | C | 17 | | Forma de las acumulaciones. |
| ACUMCOMP | C | 10 | | Componente de las acumulaciones. |
| PH | N | 3 | 1 | pH al agua 1:2.5 |
| CE1_5 | N | 4 | 2 | Conductividad eléctrica (dS/m a 25°) del extracto 1:5. |
| CACO3 | N | 4 | 1 | Porcentaje de carbonatos totales. |
| MORGANICA | N | 4 | 2 | Porcentaje de materia orgánica. |
| CALIZAACT | N | 4 | 1 | Porcentaje de caliza activa. |
| HDAD33 | N | 4 | 1 | Humedad retenida a -33 Kpa en % en peso. |
| HDAD1500 | N | 4 | 1 | Humedad retenida a -1500 Kpa en % en peso. |
| DAP | N | 4 | 0 | Densidad aparente kg/m ³ |
| CCRAD_MM | N | 5 | 1 | Capacidad de Retención de Agua Disponible del horizonte (mm). |

Anejo 3

Procedimientos de consultas del Sistema de Información de Suelos para el análisis de la información.

Procedimientos de consulta mediante lenguaje estructurado SQL para el análisis de la información del Sistema de Información de Suelos.

Descripción de las unidades cartográficas

```
SELECT DISTINCTROW UC.CODIGO, UCTIPO.DESCRIPCIO, TAXA.GGRUPO, TAXA.SGRUPO,
TAXA.CTEXTURAL, TAXA.CMINERAL, TAXA.REACCION, TAXA.CTEMP, TAXA.CPROF,
PERFIL.CPROFUND, UCPERFIL.PORCENTAJE, UCPERELA.DESCRIPCIO
FROM (((UC INNER JOIN UCTIPO ON UC.TIPO = UCTIPO.TIPO) INNER JOIN UCPERFIL ON
UC.CODIGO = UCPERFIL.CODIGO) INNER JOIN PERFIL ON UCPERFIL.PERFIL = PERFIL.PERFIL)
INNER JOIN TAXA ON PERFIL.TAXA = TAXA.TAXA) INNER JOIN UCPERELA ON
UCPERFIL.RELACION = UCPERELA.RELACION;
```

Estructura de los horizontes A

```
SELECT DISTINCT HORIZONTIP.HORIZONTIP, HORIZONTIP.HORZ_GEN,
HORIZONTIP.ESTRUCT1_GRADO, HORIZONTIP.ESTRUCT1_FORMA,
HORIZONTIP.ESTRUCT1_TAMAÑO, HORIZONTIP.ESTRUCT2_GRADO,
HORIZONTIP.ESTRUCT2_FORMA, HORIZONTIP.ESTRUCT2_TAMAÑO, HORIZONTIP.PERFILTIP
FROM HORIZONTIP
WHERE (((HORIZONTIP.HORZ_GEN) Like "A*") AND ((([HORIZONTIP].[HORZ_GEN]) Like "Ap/*"
Or ([HORIZONTIP].[HORZ_GEN]) Like "A/*")=False))
ORDER BY HORIZONTIP.HORIZONTIP, HORIZONTIP.HORZ_GEN;
```

Estructura de los horizontes Bk

```
SELECT DISTINCTROW HORIZONTIP.HORIZONTIP, HORIZONTIP.HORZ_GEN,
HORIZONTIP.ESTRUCT1_GRADO, HORIZONTIP.ESTRUCT1_FORMA,
HORIZONTIP.ESTRUCT1_TAMAÑO, HORIZONTIP.ESTRUCT2_GRADO,
HORIZONTIP.ESTRUCT2_FORMA, HORIZONTIP.ESTRUCT2_TAMAÑO
FROM HORIZONTIP
WHERE (((HORIZONTIP.HORZ_GEN) Like "*Bk*" Or (HORIZONTIP.HORZ_GEN) Like "A/Bk*")
AND ((([HORIZONTIP].[HORZ_GEN]) Like "*Bkn*" Or ([HORIZONTIP].[HORZ_GEN]) Like "A/Bkn*"
Or ([HORIZONTIP].[HORZ_GEN]) Like "*Bkm" Or ([HORIZONTIP].[HORZ_GEN]) Like
"*Ab*")=False))
ORDER BY HORIZONTIP.ESTRUCT1_GRADO, HORIZONTIP.ESTRUCT2_GRADO,
HORIZONTIP.ESTRUCT2_FORMA, HORIZONTIP.ESTRUCT2_TAMAÑO;
```

Estructura de los horizontes Bkn

```
SELECT DISTINCTROW HORIZONTIP.HORIZONTIP, HORIZONTIP.HORZ_GEN,
HORIZONTIP.ESTRUCT1_GRADO, HORIZONTIP.ESTRUCT1_FORMA,
HORIZONTIP.ESTRUCT1_TAMAÑO, HORIZONTIP.ESTRUCT2_GRADO,
HORIZONTIP.ESTRUCT2_FORMA, HORIZONTIP.ESTRUCT2_TAMAÑO, HORIZONTIP.PERFILTIP
FROM HORIZONTIP
WHERE (((HORIZONTIP.HORZ_GEN) Like "*Bkn*" Or (HORIZONTIP.HORZ_GEN) Like "A/Bkn*"))
ORDER BY HORIZONTIP.HORIZONTIP, HORIZONTIP.HORZ_GEN,
HORIZONTIP.ESTRUCT1_GRADO, HORIZONTIP.ESTRUCT1_FORMA,
HORIZONTIP.ESTRUCT1_TAMAÑO, HORIZONTIP.ESTRUCT2_GRADO,
HORIZONTIP.ESTRUCT2_FORMA, HORIZONTIP.ESTRUCT2_TAMAÑO;
```


Estructura de horizontes Bt

```
SELECT DISTINCTROW HORIZONTALIP.HORIZONTALIP, HORIZONTALIP.HORZ_GEN,
HORIZONTALIP.ESTRUCT1_GRADO, HORIZONTALIP.ESTRUCT1_FORMA,
HORIZONTALIP.ESTRUCT1_TAMAÑO, HORIZONTALIP.ESTRUCT2_GRADO,
HORIZONTALIP.ESTRUCT2_FORMA, HORIZONTALIP.ESTRUCT2_TAMAÑO
FROM HORIZONTALIP
WHERE (((HORIZONTALIP.HORZ_GEN) Like "*Bt*" Or (HORIZONTALIP.HORZ_GEN) Like "A/Bt*" Or
(HORIZONTALIP.HORZ_GEN) Like "*Ct*"))
ORDER BY HORIZONTALIP.ESTRUCT1_GRADO, HORIZONTALIP.ESTRUCT2_GRADO,
HORIZONTALIP.ESTRUCT2_FORMA, HORIZONTALIP.ESTRUCT2_TAMAÑO;
```

Estructura de los horizontes Bw

```
SELECT DISTINCTROW HORIZONTALIP.HORIZONTALIP, HORIZONTALIP.HORZ_GEN,
HORIZONTALIP.ESTRUCT1_GRADO, HORIZONTALIP.ESTRUCT1_FORMA,
HORIZONTALIP.ESTRUCT1_TAMAÑO, HORIZONTALIP.ESTRUCT2_GRADO,
HORIZONTALIP.ESTRUCT2_FORMA, HORIZONTALIP.ESTRUCT2_TAMAÑO, HORIZONTALIP.PERFILTIP
FROM HORIZONTALIP
WHERE (((HORIZONTALIP.HORZ_GEN) Like "Bw*" Or (HORIZONTALIP.HORZ_GEN) Like "A/Bw*" Or
(HORIZONTALIP.HORZ_GEN) Like "*Bw*"))
ORDER BY HORIZONTALIP.ESTRUCT1_GRADO, HORIZONTALIP.ESTRUCT2_GRADO,
HORIZONTALIP.ESTRUCT2_FORMA, HORIZONTALIP.ESTRUCT2_TAMAÑO;
```

Acumulaciones en horizonte Bk

```
SELECT DISTINCTROW HORIZONTALIP.HORIZONTALIP, HORIZONTALIP.HORZ_GEN,
HORIZONTALIP.ACUMUL_CANTIDAD, HORIZONTALIP.ACUMUL_FORMA
FROM HORIZONTALIP
WHERE (((HORIZONTALIP.HORZ_GEN) Like "*Bk*" Or (HORIZONTALIP.HORZ_GEN) Like "A/Bk*")
AND ((([HORIZONTALIP].[HORZ_GEN]) Like "*Bkn*" Or ([HORIZONTALIP].[HORZ_GEN]) Like "A/Bkn*"
Or ([HORIZONTALIP].[HORZ_GEN]) Like "*Bkm" Or ([HORIZONTALIP].[HORZ_GEN]) Like
"*Ab*")=False))
ORDER BY HORIZONTALIP.ACUMUL_CANTIDAD;
```

Acumulaciones en horizontes Bkn

```
SELECT DISTINCTROW HORIZONTALIP.HORIZONTALIP, HORIZONTALIP.HORZ_GEN,
HORIZONTALIP.ACUMUL_CANTIDAD, HORIZONTALIP.ACUMUL_FORMA
FROM HORIZONTALIP
WHERE (((HORIZONTALIP.HORZ_GEN) Like "*Bkn*"))
ORDER BY HORIZONTALIP.ACUMUL_CANTIDAD, HORIZONTALIP.ACUMUL_FORMA;
```

Acumulaciones en horizontes Bt

```
SELECT DISTINCTROW HORIZONTALIP.HORIZONTALIP, HORIZONTALIP.HORZ_GEN,
HORIZONTALIP.ACUMUL_CANTIDAD, HORIZONTALIP.ACUMUL_FORMA
FROM HORIZONTALIP
WHERE (((HORIZONTALIP.HORZ_GEN) Like "*Bt*" Or (HORIZONTALIP.HORZ_GEN) Like "A/Bt*" Or
(HORIZONTALIP.HORZ_GEN) Like "Ct*"))
ORDER BY HORIZONTALIP.ACUMUL_CANTIDAD, HORIZONTALIP.ACUMUL_FORMA;
```

Acumulaciones en horizontes Crkn

```
SELECT DISTINCTROW HORIZONTALIP.HORIZONTALIP, HORIZONTALIP.HORZ_GEN,
HORIZONTALIP.ACUMUL_CANTIDAD, HORIZONTALIP.ACUMUL_FORMA
FROM HORIZONTALIP
WHERE (((HORIZONTALIP.HORZ_GEN) Like "*Ckn*"))
ORDER BY HORIZONTALIP.HORZ_GEN, HORIZONTALIP.ACUMUL_CANTIDAD,
HORIZONTALIP.ACUMUL_FORMA;
```

Contenido de carbonato cálcico en horizontes A

```
SELECT DISTINCT HORIZONTALIP.HORIZONTALIP, HORIZONTALIP.HORZ_GEN, HORIZONTALIP.CACO3
FROM HORIZONTALIP
WHERE (((HORIZONTALIP.HORZ_GEN) Like "A*") AND ((HORIZONTALIP.CACO3)<>9999) AND
(((HORIZONTALIP].[HORZ_GEN]) Like "Ap/*" Or ((HORIZONTALIP].[HORZ_GEN]) Like "A/*")=False));
```

Contenido de carbonato cálcico en horizontes Bkn

```
SELECT DISTINCTROW HORIZONTALIP.HORIZONTALIP, HORIZONTALIP.HORZ_GEN,
HORIZONTALIP.CACO3
FROM HORIZONTALIP
WHERE (((HORIZONTALIP.HORZ_GEN) Like "*Bkn*") AND ((HORIZONTALIP.CACO3)<>9999))
ORDER BY HORIZONTALIP.HORZ_GEN;
```

Contenido de carbonato cálcico en horizontes Bt

```
SELECT DISTINCTROW HORIZONTALIP.HORIZONTALIP, HORIZONTALIP.HORZ_GEN,
HORIZONTALIP.CACO3
FROM HORIZONTALIP
WHERE (((HORIZONTALIP.HORZ_GEN) Like "*Bt*" Or (HORIZONTALIP.HORZ_GEN) Like "A/Bt*") AND
((HORIZONTALIP.CACO3)<>9999))
ORDER BY HORIZONTALIP.CACO3;
```

Contenido de carbonato cálcico en horizontes Bw

```
SELECT DISTINCTROW HORIZONTALIP.HORIZONTALIP, HORIZONTALIP.HORZ_GEN,
HORIZONTALIP.CACO3
FROM HORIZONTALIP
WHERE (((HORIZONTALIP.HORZ_GEN) Like "Bw*" Or (HORIZONTALIP.HORZ_GEN) Like "A/Bw*" Or
(HORIZONTALIP.HORZ_GEN) Like "*Bw*") AND ((HORIZONTALIP.CACO3)<>9999))
ORDER BY HORIZONTALIP.CACO3;
```

Relación entre usos del suelo y contenidos de materia orgánica en perfiles tipo.

```
SELECT DISTINCTROW PERFILTIP.USO, [Materia orgánica perfiles tipo].PROMEDIODE
FROM PERFILTIP INNER JOIN [Materia orgánica perfiles tipo] ON PERFILTIP.PERFILTIP = [Materia
orgánica perfiles tipo].PERFILTIP
WHERE (((PERFILTIP.USO)=12 Or (PERFILTIP.USO)=37) AND (([Materia orgánica perfiles
tipo].PROMEDIODE)>0));
```

Perfiles con evidencias de mezcla de materiales de horizontes subsuperficiales

```
SELECT DISTINCTROW PERFILTIP.PERFILTIP, PERFILTIP.TAXA,  
PERFILTIP.[MEZCLAHORZ_A/B/C], PERFILTIP.EVIDENCIAS_MEZCLA,  
HORIZONTALIP.HORZ_GEN, PERFILTIP.PROFMAXLABO  
FROM PERFILTIP INNER JOIN HORIZONTALIP ON PERFILTIP.PERFILTIP = HORIZONTALIP.PERFILTIP  
WHERE (((PERFILTIP.EVIDENCIAS_MEZCLA) <> "NIVELACIONES") AND  
(HORIZONTALIP.HORZ_GEN) Like "Ap" Or (HORIZONTALIP.HORZ_GEN)="Ap1"))  
ORDER BY PERFILTIP.EVIDENCIAS_MEZCLA;
```

Índice de Tablas

| | |
|--|-----|
| Tabla 1.1. Superficie dedicada al cultivo de la viña. Periodo 1970-1994. (Fuente: Anuarios de Estadística Agraria, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación)..... | 7 |
| Tabla 2.1. Sistema de clasificación de geoformas (Zinck 1988)..... | 28 |
| Tabla 2.2. Clases de adyacencia entre geoformas. | 31 |
| Tabla 2.3. Clases de amplitud de relieve o relieve interno (Meijerink 1988). | 32 |
| Tabla 2.4. Clases de densidad de drenaje (adaptado de Meijerink 1988). | 32 |
| Tabla 2.5. Clases de rugosidad del terreno (varianza de la pendiente). | 35 |
| Tabla 2.6. Leyenda del mapa de geoformas del Alt Penedès-Anoia. | 38 |
| Tabla 2.7. Atributos topográficos descriptores de las geoformas. | 41 |
| Tabla 3.1. Propiedades de los suelos caracterizadas y métodos empleados. | 78 |
| Tabla 3.2. Bases del diseño y reglas para la definición de la base de datos de suelos. | 82 |
| Tabla 3.3. Carbonato cálcico equivalente y acumulaciones de carbonato cálcico en perfiles con horizontes Bwkn (edafoogésis en calcilutitas) y Crkn. | 84 |
| Tabla 3.4. Familias de suelos descritos en el Alt Penedès – Anoia, según el sistema de clasificación de suelos Soil Taxonomy (SSS 1975, SSS 1994) y correspondencia con el sistema de clasificación FAO-UNESCO (FAO 1990). | 85 |
| Tabla 3.5. Modelo de suelo-paisaje del área de montaña (Sierra Prelitoral). | 86 |
| Tabla 3.6. Modelo suelo-paisaje del área de pie de monte. | 91 |
| Tabla 3.7. Modelo de suelo-paisaje del área de vertientes y barrancos. | 96 |
| Tabla 3.8. Modelo de suelo-paisaje del área de relieve suavemente ondulado. | 100 |
| Tabla 3.9. Modelo de suelo-paisaje del área de niveles aluviales recientes. | 102 |
| Tabla 3.10. Clave de la base de datos de suelos del Alt Penedès - Anoia. (Representación simplificada de la información de suelos contenida en la base de datos del sistema de información de suelos). | 107 |
| Tabla 3.11. Contenidos de materia orgánica de los horizontes Ap analizados. Criterio SINEDARES (C.B.D.S.A. 1983). | 115 |
| Tabla 3.12. Usos del suelo y niveles de materia orgánica en los horizontes Ap de los perfiles descritos en el área de estudio. | 116 |
| Tabla 3.13. Estructura de los horizontes de los perfiles tipo descritos en campo en el Alt Penedès – Anoia. (Frecuencia de horizontes). | 118 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 3.14. Resultados de los tests de prueba de independencia entre frecuencias observadas y esperadas para la comparación del grado de desarrollo de estructura entre horizontes (Chi cuadrado)..... | 120 |
| Tabla 3.15. Contenido de carbonato cálcico equivalente de los horizontes de los perfiles tipo analizados (frecuencia de horizontes)..... | 121 |
| Tabla 3.16. Acumulaciones secundarias de carbonatos descritas en horizontes de los perfiles tipo..... | 122 |
| Tabla 3.17. Evidencias de mezcla de materiales en horizontes superficiales por el efecto de la erosión y/o el laboreo profundo..... | 124 |
| Tabla 3.18. Resultados de los tests de prueba de independencia entre frecuencias observadas y esperadas para la comparación de la presencia de evidencias de mezcla en horizontes superficiales en función de la profundidad máxima de laboreo..... | 125 |
| Tabla 3.19. Prueba t-Student de separación de medias entre los contenidos de materia orgánica en los horizontes superficiales de suelos con evidencias de mezcla de materiales y de perfiles sin evidencias de mezcla..... | 126 |
| Tabla 3.20. Prueba t-Student de separación de medias de contenido de carbonato cálcico en perfiles con evidencias de mezcla en los horizontes superficiales de suelos con evidencias de mezcla de materiales y de perfiles sin evidencias de mezcla..... | 127 |
| Tabla 3.21. Resultados de los tests de prueba de independencia entre frecuencias observadas y esperadas para la comparación de la estructura en los horizontes superficiales de suelos con evidencias de mezcla de materiales de horizontes subsuperficiales y de suelos sin evidencias de mezcla..... | 128 |
| Tabla 3.22. Prueba t-Student de separación de medias de la profundidad efectiva del suelo en perfiles con evidencias de mezcla en horizontes superficiales y sin evidencias de mezcla..... | 128 |
| Table 4.1. Main landscape units in the Alt Penedès-Anoia region..... | 142 |
| Table 4.2. Main informational classes for land cover/use mapping in the Alt Penedès – Anoia..... | 147 |
| Table 4.3. Factorial scores applied to generate the friction surface used in the modelling of the development of existing gullies..... | 152 |
| Table 4.4. Drainage density, gully-eroded area and volume in the main landscape units of the Alt Penedès-Anoia region..... | 154 |
| Table 4.5. Dominant planar form and degree of crenelation of the gully perimeter in the landscape units..... | 156 |
| Table 4.6. Erosional activity class and main erosion processes on gully walls in the Alt Penedès – Anoia region..... | 164 |
| Table 4.7. Chi Square (X ²) test between erosional activity classes and landscape units. Differences between the distribution of observed and expected frequencies..... | 166 |

| | |
|---|-----|
| Table 4.8. Relationships between the erosional activity classes and topographical variables in the gully eroded areas..... | 167 |
| Table 4.9. Matrix of changes occurred in the gullied areas of the Rierusa catchment in the period 1957 – 1993, (hectares)..... | 172 |
| Table 4.10. Summary of the topographic and vegetation cover characteristics of the gullied areas (period 1957-1993) and their adjacent gully-eroded areas (1957 situation). | 175 |
| Table 4.11. Observed frequencies of the probability classes of existing gully erosion at parcel level in the different landscape units..... | 183 |
| Tabla 5.1.1. Leyenda del mapa de unidades de paisaje/relieve (geoformas) del Alt Penedès-Anoia. | 206 |
| Tabla 5.1.2. Clases de adyacencia entre unidades cartográficas en función del índice de adyacencia. | 207 |
| Tabla 5.1.3. Descripción de los campos de la tabla de atributos de polígonos (PAT) de la cobertura Paisaje/Relieve..... | 210 |
| Tabla 5.1.4. Descripción de los campos de la tabla de atributos de arcos (AAT) de la cobertura Paisaje/Relieve..... | 211 |
| Tabla 5.1.5. Consultas SQL para la obtención del índice de adyacencia entre unidades del mapa vectorial de Paisaje/Relieve..... | 215 |
| Tabla 5.1.6. Índice de adyacencia entre unidades cartográfica del mapa de Paisaje/Relieve y las áreas de barrancos o badlands (Alt Penedès-Anoia). | 216 |
| Table 5.2.1. Land cover/use classes identified at pixel or sub-pixel resolution in the Alt Penedès-Anoia region..... | 232 |
| Table 5.2.2. Legend of the Land cover/use map of the Alt Penedès-Anoia region (generalisation level 1). | 233 |
| Table 5.2.3. Land cover/use class hierarchy considered for the Alt Penedès-Anoia case study. | 234 |
| Table 5.2.4. Accuracy assessment of the Land cover/use map of the Alt Penedès-Anoia region, (generalisation level 2)..... | 236 |
| Table 5.3.1. DOCELL process to find the outlets of the elementary catchments as implemented in Arc Macro Language..... | 257 |
| Table 5.3.2. Topographical variables and threshold area for the sample cathments in the two test areas located in the Alt Penedès – Anoia region (Catalonia, NE Spain)..... | 260 |
| Table 5.3.3. Results of the linear regression analysis between the threshold area values and topographical variables for the sample catchments..... | 260 |
| Table 5.4.1. Main relief and lithologic characteristics of the sample catchments..... | 273 |

Table 5.4.2. Relief, soil, and land use/management factors and sampling methods. 274

Table 5.4.3. Results of the t-test..... 277

Table 5.4.4. Results of the Chi-Square-test. 277

Table 5.4.5. Results of the Stepwise Regression..... 278

Table 5.4.6. Threshold slope degrees for different slope planar forms and probability levels. ... 281

Table 5.4.7. Error matrix for the assessment of the existing gully erosion prediction in the Alt Penedès-Anoia region..... 283

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1.1. Localización del área de estudio. (Imagen Landsat TM de 28 de marzo de 1993, composición en falso color rojo-verde-azul 543)..... | 5 |
| Figura 1.2. Ejemplo de los cambios producidos en las últimas décadas en los sistemas de cultivo de la viña. Izquierda: fotografía aérea de 1957 (escala original aproximada 1:30.000, en la zona de Sant Llorenç d’Hortons) que muestra la práctica de cultivos a nivel y bancales en las plantaciones de viña. Derecha: fotografía aérea de 1986 (escala original aproximada 1:30.000, en la misma zona), muestra la desaparición de los cultivos a nivel y bancales, y el crecimiento de la cárcava ocurrido en este periodo..... | 8 |
| Figura 1.3. Izquierda: concentración de flujo en un canal de desagüe en el borde de una parcela de viña durante una tormenta. Derecha: cárcava desarrollada en el borde de la parcela, donde se concentra el flujo del agua. Esta cárcava va siendo periódicamente rellenada con tierra por el agricultor, ya que afecta a uno de los caminos de paso de la maquinaria en la parcela. | 9 |
| Figura 1.4. Secuencia de la disección de parcelas y del territorio causada por la erosión por cárcavas y barrancos. Izquierda: dificultad para el tránsito de la maquinaria por la incisión de una cárcava en una parcela de viña (foto: A. Meyer). Centro: cárcava desarrollada en una parcela transformada antes de la plantación de la viña. Derecha: barranco, que supone una gran disección en el paisaje y la pérdida de superficie de cultivo a largo plazo. | 9 |
| Figura 1.5. Diseño de parcelas para nuevas plantaciones de viña. Izquierda: movimientos de tierra. Derecha superior: parcela tras los movimientos de tierra y nivelación. Derecha inferior: colapso de la zona de barranco rellenada en una nueva plantación de viña tras las primeras lluvias (foto: A. Meyer)..... | 10 |
| Figura 1.6. Estructura de la presente tesis. | 14 |
| Figura 2.1. Esquema geológico y disposición de las fallas de la Depresión del Vallès – Penedès, (fuente: Cabrera 1981). Localidades: C, Castellbisball; Ce, Cerdanyola; E, Esparraguera; EP, El Papiol; G, Gelida; M, Martorell, O, Olesa; P, Piera; Pa, Pacs; R, Rubí; SAP, Sant Andreu de la Barca; SCV, Sant Cugat del Vallès; SMS, Sant Martí Sarroca; SMV, Sta. M ^a de Vilalba; SSA Sant Sadurní d’Anoia; V, Vilobí; VP, Vilafranca del Penedès..... | 24 |
| Figura 2.2. Interpretación geológica del perfil gravimétrico transversal de la cuenca del Penedès. Destaca el considerable grosor de los sedimentos neógenos en la parte noroccidental de la cuenca. (Fuente: Casas y Permanyer en Folch 1986)..... | 26 |
| Figura 2.3. Proceso metodológico llevado a cabo para la identificación y caracterización de las geoformas. | 29 |
| Figura 2.4. Representación de una submatriz de 3x3 celdas del Modelo Digital de Elevaciones. Los valores Zi representan la altitud en el punto central de la celda y L es la distancia entre celdas o resolución del MDE..... | 33 |
| Figura 2.5. Unidades de Paisaje del área de estudio (Alt Penedès – Anoia). (Mapa elaborado a partir de la fotointerpretación de fotografías aéreas y posterior georeferenciación y digitalización vectorial). (Bn indica zona norte de la unidad de paisaje B, y Bs indica zona sur de la unida de paisaje B). | 36 |
| Figura 2.6. Mapa de geoformas del Alt Penedès – Anoia. Escala original 1:50.000. (Ver leyenda con la descripción de las geoformas en la Tabla 2.6). (Mapa elaborado a partir de la | |

| | |
|--|----|
| fotointerpretación de fotografías aéreas y posterior georeferenciación y digitalización vectorial en ArcInfo). | 39 |
| Figura 2.7. Localización de los perfiles topográficos para la descripción morfológica de las geoformas. | 42 |
| Figura 2.8. Relieve característico de la unidad de paisaje de montaña (Sierra Prelitoral). | 43 |
| Figura 2.9. Perfil topográfico y de pendiente P-1. (Perfiles obtenidos a partir del modelo digital de elevaciones y de pendientes. Las letras en el interior del gráfico indican los códigos de la leyenda del mapa de geoformas, Tabla 2.6). | 44 |
| Figura 2.10. Perfil topográfico y de pendiente P-2. | 45 |
| Figura 2.11. Vista de la Plana de Mas Marquet, entre Piera y Hostalets de Pierola. | 46 |
| Figura 2.12. Perfil topográfico P-3. | 48 |
| Figura 2.13. Perfil topográfico P-4. | 49 |
| Figura 2.14. Perfil topográfico P-5. | 50 |
| Figura 2.15. Perfil topográfico P-6. | 50 |
| Figura 2.16. Relieve característico de la unidad de vertientes y barrancos. Destaca el carácter complejo de las vertientes y la disección del paisaje por la incisión de la red de drenaje. | 53 |
| Figura 2.17. Perfil topográfico y de pendiente P-7. | 54 |
| Figura 2.18. Perfil topográfico y de pendiente P-8. | 55 |
| Figura 2.19. Perfil topográfico y de pendiente P-9. | 55 |
| Figura 2.20. Morfología del paisaje característica de la unidad de relieve suavemente ondulados. | 57 |
| Figura 2.21. Perfil topográfico y de pendiente P-10. | 58 |
| Figura 2.22. Perfil topográfico y de pendiente P-11. | 59 |
| Figura 2.23. Perfil topográfico y de pendiente P-12. | 60 |
| Figura 2.24. Vista del valle del río Anoia desde la Sierra del Bardoch. Se distingue claramente la llanura aluvial. Más difícil resulta la distinción de los diferentes niveles de terraza, que están conectados por vertientes de enlace formadas por materiales de origen coluvial. | 62 |
| Figura 2.25. Perfil topográfico y de pendiente P-13. | 63 |
| Figura 2.26. Perfil topográfico y de pendiente P-14. | 64 |
| Figura 2.27. Perfil topográfico y de pendiente P-15. | 64 |

- Figura 3.1.** Esquema del proceso metodológico llevado a cabo para el estudio de las relaciones suelo-paisaje, diseño e implementación del sistema de información de suelos y estudio de los procesos formadores y propiedades de los suelos del Alt Penedès –Anoia..... 76
- Figura 3.2.** Áreas modelo para el análisis de las relaciones suelo-paisaje con la localización de los perfiles estudiados..... 77
- Figura 3.3.** (a) Perfil PM05 (Palexeralf petrocálcico, arcillosa fina, mezclada, térmica), y (b) perfil PM08 (Haploxeralf típico, esquelético franca, mezclada, térmica), ambos en las Planas de Mas Marquet (entre Piera y Hostalets de Pierola). 87
- Figura 3.4.** (a) Perfil PM06 (Xerochrept calcixeróllico, franca fina, mezclada, térmica), y (b) perfil PM07 (Xerochrept calcixeróllico, limosa fina, mezclada, térmica), ambos en el área colindante a las Planas de Mas Marquet (entre Piera y Hostalets de Pierola). 88
- Figura 3.5.** (a) Perfil TL70 (Xerochrept petrocálcico, franca, mezclada, térmica, superficial) en el Carrer de Can Rosell, y (b) perfil TL54 (Haploxeralf cálcico, franca fina, carbonática, térmica) en Can Cardús (Torrelavit). 89
- Figura 3.6.** (a) Perfil PP38 (Xerochrept petrocálcico, franca, mezclada, superficial, térmica) en Can Suriol (Guardiola de Font Rubí), y (b) perfil PP39 (Xerochrept fluvéntico, limosa fina, mezclada, térmica) en El Fons de Can Calix (Guardiola de Font Rubí)..... 90
- Figura 3.7.** (a) Perfil PM13 (Xerochrept calcixeróllico, franca gruesa, carbonática, térmica) en Can Bonastre (Masquefa), y (b) perfil ML29 (Xerochrept calcixeróllico, arenosa, mezclada, térmica) en Can Atalaya (Gelida). 92
- Figura 3.8.** (a) Perfil PM14 (Xerochrept calcixeróllico, franca gruesa, mezclada, térmica) en Can Bonastre (Masquefa), (b) perfil ML26 (Xerochrept calcixeróllico, limosa fina, carbonática, térmica) en Monistrol d’Anoia, y (c) perfil ML20 (Xerochrept calcixeróllico, franca gruesa, carbonática, térmica) en Can Prats (Sant Llorenç d’Hortons). 93
- Figura 3.9.** Incremento de la pedregosidad superficial (rizoconcrecciones de caliza) como consecuencia de la incorporación en superficie de endopediones cálcicos de Xerochrepts calcixeróllicos con mineralogía carbonática, y detalle de las rizoconcrecciones de caliza. 94
- Figura 3.10.** (a) Perfil PM15 (Xerochrept fluvéntico, limosa fina, mezclada, térmica), en La Grua (Piera). (b) perfil ML24 (Xerorthent típico, franca, mezclada (calcárea), térmica, superficial), en Can Prats (Sant Llorenç d’Hortons), y (c) perfil ML32 (Xerorthent típico, limosa, mezclada (calcárea), térmica, superficial), en Can Atalaya (Gelida). 95
- Figura 3.11.** (a) Perfil PP51 (Xerochrept calcixeróllico, franca fina, mezclada, térmica), en Can Baldús (Santa Fe del Penedès), (b) perfil PP43 (Xerochrept calcixeróllico, franca gruesa, carbonática, térmica) en Torrelavit, y (c) perfil PP47 (Xerorthent típico, franca, mezclada (calcárea), superficial) en El Gorner (Pla del Penedès). 97
- Figura 3.12.** (a) Perfil PP44 (Xerochrept calcixeróllico, esquelética arenosa, carbonática, térmica) en Can Nadal (Torrelavit), (b) perfil PP48 (Xerochrept calcixeróllico, franca gruesa, mezclada, térmica) en El Gorner (Pla del Penedès), y (c) PP45 Xerofluent típico, limosa fina, mezclada (calcárea), térmica) en Can Nadal (Torrelavit). 98

| | |
|--|-----|
| Figura 3.13. (a) Perfil PP53 (Xerochrept acuico, franca gruesa, mezclada, térmica) en El Pont (Santa Fe del Penedès), y (b) perfil PP42 (Xerochrept fluvéntico, limosa fina, mezclada, térmica) en Can Nadal (Torrelavit)..... | 99 |
| Figura 3.14. (a) Perfil ML18 (Xerochrept petrocálcico, franca, mezclada, térmica, superficial) en Monistrol d’Anoia, (b) perfil ML22 (Xerochrept calcixeróllico, esquelética franca, carbonática, térmica) en Monistrol d’Anoia, y (c) perfil ML23 (Xerofluvent típico, limosa fina, mezclada (calcárea), térmica) en Monistrol d’Anoia. | 101 |
| Figura 3.15. Representación cartográfica de las unidades cartográficas de la base de datos de suelos del Alt Penedès – Anoia. Escala cartográfica original de la información 1:50.000..... | 105 |
| Figura 3.16. Diagrama de Entidad-Relación que representa el modelo conceptual de la base de datos de suelos. En el diagrama aparecen las entidades, los atributos o identificadores clave y externos y las relaciones. | 112 |
| Figura 3.17. Ejemplo de consulta a la base de datos relacional del sistema de información de suelos mediante lenguaje SQL en el programa Access (Microsoft). El ejemplo muestra una consulta compleja para obtener la información relativa a la composición de las unidades cartográficas de la base de datos de suelos..... | 114 |
| Figura 3.18. Suelo con horizonte argílico enterrado por aportes aluviales recientes en una terraza del río Anoia..... | 121 |
| Figura 3.19. Operación de volteo de la parte superior del suelo previa a la plantación de viñas en una parcela. | 124 |
| Figure 4.1. Gully erosion mapping and modelling strategies. | 139 |
| Figure 4.2. Main landscape units in the Alt Penedès – Anoia region and gully eroded areas. | 141 |
| Figure 4.3. Research plan for gully erosion mapping and modelling in the Alt Penedès - Anoia region. | 144 |
| Figure 4.4. Methodological process applied to the characterisation of gully erosion at regional scale: drainage network, gully-eroded area and volume and sidewall morphology. | 146 |
| Figure 4.5. Methodological process for mapping the present erosional activity of walls of large gullies. | 148 |
| Figure 4.6. Methodological process for the analysis of changes on gullies and for the calculation of erosion rates at sub-catchment scale. | 149 |
| Figure 4.7. Methodological process applied to map the probable areas where small gullies exist and can reach bigger dimensions in the Alt Penedès – Anoia..... | 151 |
| Figure 4.8. Drainage network of the Alt Penedès-Anoia region, superimposed to the main landscape units..... | 153 |
| Figure 4.9. Location of the cross-sectional shapes referred in Figure 4.10 and Figure 4.11..... | 157 |
| Figure 4.10. Cross-sectional shapes of large gullies in the northern area of the Piedmont-glacis unit and the High dissected valley-glacis unit indicated in Figure 4.9..... | 158 |

| | |
|--|-----|
| Figure 4.11. Cross-sectional shapes of the large gullies in the southern area of the Piedmont-glacis, Low dissected valley-glacis and Valley units indicated in Figure 4.9..... | 159 |
| Figure 4.12. Base level and longitudinal profiles of the main rivers and tributaries in the study area..... | 160 |
| Figure 4.13. Examples of gully walls classified as Semi-active – Stable (> 60% vegetation cover)..... | 162 |
| Figure 4.14. Examples of gully walls classified as Active – Semi-active (< 40% vegetation cover)..... | 162 |
| Figure 4.15. Erosional activity of gully walls and other areas >20 % slope degree..... | 163 |
| Figure 4.16. Processes in the gully borders that contribute to the lateral retreat of gullies. Example of a circular slip..... | 164 |
| Figure 4.17. Outlet of a drainage channel in a vineyard parcel that has produced a retreat of the gully wall by direct impact of water flow and undercutting of the wall. | 165 |
| Figure 4.18. Left: Fissure produced in border between a parcel and a gully. Right: Slip that produces gully wall retreat. | 165 |
| Figure 4.19. Small and medium-size gullies in the Rierusa catchment: 1957 and 1993 situations..... | 168 |
| Figure 4.20. Example of lateral retreat of a gully that makes the gully is represented as an area feature in the 1993 situation. | 169 |
| Figure 4.21. Filling of gullies as consequence of the levelling of the parcel..... | 169 |
| Figure 4.22. Main active areas of gully erosion (small and medium-size gullies) in the studied period..... | 170 |
| Figure 4.23. Left: ephemeral gully formed during a high intensity precipitation event and that is later removed by tillage operations. Right: Gully developed in the border of a parcel that is periodically filled. | 171 |
| Figure 4.24. Land cover/use maps of the inside gullied area in the Rierusa catchment. Left: 1957, right: 1993..... | 171 |
| Figure 4.25. Areas of the Rierusa catchment affected by the retreat of gully walls during the period 1957-1993, and land cover/use class in the 1993 situation. | 173 |
| Figure 4.26. Stack of stones in the boundary between a gully and a parcel in order to avoid the retreat of the gully sidewall..... | 174 |
| Figure 4.27. Gully-eroded areas in the Rierusa catchment that were filled during the period 1957-1993 and example of a new parcel after filling some gully-eroded areas. | 176 |
| Figure 4.28. Left: New vineyard parcel after the levelling of an old parcel and the filling of part of a gully (left) in the Rierusa catchment. Right: Filled gully. | 176 |

| | |
|--|-----|
| Figure 4.29. Changes in the intersect gullied areas in the Rierusa catchment. Period 1957 – 1993. | 177 |
| Figure 4.30. Result of the subtraction of the 1957 and 1993 digital elevation models in the intersect gullied areas of the Rierusa catchment and location of the cross-sections represented in Figure 4.31. | 179 |
| Figure 4.31. Cross-sections of the 1957 and 1993 digital elevation models and of the altitude differences of representative changes produced in the Rierusa catchment..... | 180 |
| Figure 4.32. Histogram of the altitude differences in the intersect gullied areas and considered altitude differences. | 181 |
| Figure 4.33. Result of the subtraction of the 1957 and 1993 digital elevation models in the areas affected by the retreat of gully walls in the Rierusa catchment. | 182 |
| Figure 4.34. Probability of existing gully erosion at parcel level. (Based on the existing gully erosion prediction model of Meyer and Martínez-Casasnovas 1998)..... | 184 |
| Figure 4.35. Friction surface that integrates the observed prone conditions and barriers for the retreat of gullies in the Alt Penedès – Anoià. The values indicate the facility/difficulty the terrain offers to the retreat of gully walls. | 186 |
| Figure 4.36. Cost-distance surface. The values represent the cost of movement of gully walls from gully bordering areas towards ungullied headwater areas according to the considered friction surface. | 187 |
| Figure 4.37. Cross-tabulation image of the measured retreat areas and the predicted gullied areas in the period 1957-1993 in the gullies of the Rierusa basin..... | 188 |
| Figure 4.38. Hypothetical situation of the areas affected by the retreat of large gullies in the period 1993-2030 in the Alt Penedès – Anoià region, according to the proposed evolutive gully retreat model. | 189 |
| Figure 4.39. (A) Processes in the border between parcels and gullies, and (B) possible solution to avoid the saturation of those areas by subsurface runoff. | 190 |
| Figure 4.40. (A) Concentration of runoff water in drainage channels and free fall of water on the gully walls, (B) erosion of the gully walls and gravity mass movements, and (C) possible solution by means of the canalisation of runoff water from parcels to gully beds..... | 192 |
| Figura 5.1.1. Percepción de relaciones espaciales entre objetos del terreno representados en un mapa y en un mapa vectorial en un Sistema de Información Geográfica..... | 204 |
| Figura 5.1.2. Relación de adyacencia entre áreas (representadas por polígonos). (Molenaar y Martínez-Casasnovas 1996). | 208 |
| Figura 5.1.3. Representación gráfica vectorial y tablas de topología. Los polígonos representan delineaciones de unidades cartográficas (UC), con los que guardan una relación uno-a-muchos: por ejemplo, una UC puede tener una o más delineaciones en el mapa, mientras que una delineación solo pertenece a una UC. | 209 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.1.4. Estructura Formal de Datos (FDS) según Molenaar (1989). (Las flechas representan relaciones uno-a-muchos entre entidades: p.e. un objeto línea se compone de uno o más arcos)..... | 209 |
| Figura 5.1.5. Estructura Formal de Datos (FDS) implementada en ArcInfo (van Smaalen y Molenaar 1993). (Las flechas representan relaciones uno-a-muchos). | 210 |
| Figura 5.1.6. Niveles topológicos de la estructura de datos del mapa vectorial de unidades cartográficas utilizados para la obtención del índice de adyacencia. (En otras aplicaciones la entidad UC puede ser diferente a la de Paisaje/Relieve, p.e. unidades de vegetación, al igual que las delineaciones de las UCs). | 212 |
| Figura 5.1.7. Diagrama de flujo con el procedimiento utilizado para el cálculo del índice de adyacencia a partir de las tablas de atributos del mapa vectorial de unidades cartográficas. | 214 |
| Figura 5.1.8. Unidades de paisaje/relieve (geoformas) del Alt Penedès-Anoia (Barcelona). (Ver descripción de la leyenda en la Tabla 5.1.1)..... | 217 |
| Figura 5.1.9. Índice de Adyacencia entre las unidades cartográficas de paisaje/relieve (geoformas) a las áreas de barrancos o badlands (Alt Penedès-Anoia, Barcelona). | 218 |
| Figure 5.2.1. Landsat TM image of the Alt Penedès-Anoia region (Catalonia, NE Spain). False colour composite red-green-blue 543. March 1993. | 226 |
| Figure 5.2.2. Generalisation hierarchy structure for land cover/use mapping from remotely sensed data. Level 1 represents the basic level of spatial information (more detailed), that is defined by membership of pixels of spectral classes to elementary land cover/use classes. Level 2 represents a higher level in the generalisation hierarchy (less detailed), that is created by class generalisation and aggregation of mapping units of level 1. | 228 |
| Figure 5.2.3. Relational database model for definition of mapping units at different generalisation levels according to the proposed hierarchy structure of figure 2..... | 229 |
| Figure 5.2.4. Land cover/use mapping units of the Alt Penedès-Anoia region, (second generalisation level). | 235 |
| Figure 5.2.5. Example of querying from the second to the first generalisation level. | 237 |
| Figure 5.3.1. Representation of hydrographic terrain characteristics. | 246 |
| Figure 5.3.2. Nested hierarchy of drainage basins (after Marsh 1991). | 247 |
| Figure 5.3.3. Drainage elements, elementary catchments and aggregation hierarchy (after Martínez-Casasnovas 1994)..... | 248 |
| Figure 5.3.4. (A) Representation of a drainage network in a vector data structure (the nodes or junctions are labeled). (B1) and (C1) Catchments if nodes 4 and 2 are respectively used as source points of watersheds. (In a raster data structure the same catchment's boundaries are derived if the nodes are considered as source cells). (B2) and (C2) Elementary catchments that should be obtained according to Martínez-Casasnovas (1994)..... | 250 |
| Figure 5.3.5. Location of the test areas and sample catchments that were considered..... | 251 |

Figure 5.3.6. (A) Raster data structure of the drainage network of Figure 5.3.4. (The cell values represent the Shreve stream order). (B) Representation of the drainage network element junctions (#) and the cells that are considered as outlets to compute each elementary catchment (*). 253

Figure 5.3.7. Examples of criteria that the processing cell (central cell in the 3 x 3 window) must fulfil to be labeled as outlet cell: (A) The processing cell fulfil the required criteria; (B) The processing cell is a cell of the drainage network but no neighboring cell is of a higher Shreve order; (C) The processing cell is not a cell of the drainage network. 255

Figure 5.3.8. Arcinfo-Grid neighbourhood notation: cell position within a 3 x 3 window. 255

Figure 5.3.9. Flow diagram of the program to obtain the drainage networks and the elementary catchments. 256

Figure 5.3.10. Resulting drainage networks (Rierusa basin) after the application of different threshold area values and comparison with drainage network as result of the photo-interpretation..... 259

Figure 5.3.11. Elementary catchments of the Rierusa (A) and Romani-Bribons (B) drainage basins according to the proposed methodology. (The drainage network has been superimposed)..... 262

Figure 5.4.1. Location of the study area. 271

Figure 5.4.2. Development of gullies in vineyard parcels and damages. 272

Figure 5.4.3. Automatic delineation of the basic information unit (b.s.u.)..... 275

Figure 5.4.4. The results of the DIFCHISQU and DIFDEV regression diagnostics. (Observation number 10 was rejected because the high delta Chi-square and deviation differences)..... 280

Figure 5.4.5. Logistic curves for each slope contour form. 281

Figure 5.4.6. Probability of existence of gully erosion at vineyard parcels in the Rierussa and Romani-Bribons catchments (Alt Penedès-Anoia region)..... 282

Abreviaciones

Abreviaciones

| | |
|----------|---|
| AAT | Arc Attribute Table |
| b.s.u. | Basic Spatial Unit |
| CE | Conductividad Eléctrica |
| CRAD | Capacidad de Retención de Agua Disponible para la plantas |
| DEM | Digital Elevation Model |
| D.O. | Denominación de Origen |
| FDS | Formal Data Structure |
| GIS | Geographical Information System |
| IGME | Instituto Geológico y Minero de España |
| LCUC | Land Cover/Use Class |
| MAPA | Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación |
| MDE | Modelo Digital de Elevaciones |
| MU | Mapping Unit |
| NDVI | Normalized Difference Vegetation Index |
| PAT | Polygon Attribute Table |
| PCA | Principal Component Analysis |
| RBDMS | Relational DabaBase Management System |
| SQL | Structured Query Language |
| SCS-USDA | Soil Conservation Service – United States Department of Agriculture |
| SIG | Sistemas de Información Geográfica |
| SIS | Sistema de Información de Suelos |
| SSS | Soil Survey Staff |
| TM | Thematic Mapper |

| | |
|------|-------------------------------|
| UC | Unidad Cartográfica |
| USLE | Universal Soil Loss Equation |
| UTM | Universal Transverse Mercator |