



**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



Universitat de Lleida  
Registre General

15 SET. 1998

Memoria presentada por:

**José Antonio Martínez Casasnovas**

Para optar al grado de Doctor

E: 4886

S:



Director: Prof. Dr. Jaume Porta i Casanellas

El director de la tesis,

El doctorando,

Lleida, septiembre de 1998

**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 argiluvación ocupan las posiciones más antiguas. Presentan evidencias de truncamiento por acción de la erosión, con el endopedión 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  $\text{CO}_3\text{Ca}$ ).

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

Clase de contenido de $\text{CO}_3\text{Ca}$ 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%  $\text{CO}_3\text{Ca}$ ), dándose los máximos (>50%  $\text{CO}_3\text{Ca}$ ) en calcilitas 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% CO<sub>3</sub>Ca). Perfiles tipo con estas características son PM13 (en el área modelo de Piera – Masquefa), TL58 y TL59 (en el área modelo de Torrelavit – Riudevittles). 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 recalificados (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 recalificados. 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 Cálculo			Endopedión Argílico		Otros horizontes
	Bk	Bwkn	Crkn	Btkn	Ctk	Bwk
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 calcilutitas o areniscas	15
Fragmentos de horizonte petrocálcico	5
Abundancia de elementos gruesos	4
Nódulos de CO <sub>3</sub> 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 calcilutitas 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.**

<b>Todos los suelos estudiados</b>		
	<b>Materia orgánica (%) en horizontes superficiales sin evidencias de mezcla</b>	<b>Materia orgánica (%) en horizontes superficiales con evidencias de mezcla</b>
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		
<b>Suelos con profundidad máxima de laboreo de 30 cm</b>		
	<b>Materia orgánica (%) en horizontes superficiales sin evidencias de mezcla</b>	<b>Materia orgánica (%) en horizontes superficiales con evidencias de mezcla</b>
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.**

<b>Todos los suelos estudiados</b>		
	<b>Carbonato cálcico (%) en horizontes superficiales sin evidencias de mezcla</b>	<b>Carbonato cálcico (%) en horizontes superficiales con evidencias de mezcla</b>
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		
<b>Suelos con profundidad máxima de laboreo de 30 cm</b>		
	<b>Carbonato cálcico (%) en horizontes superficiales sin evidencias de mezcla</b>	<b>Carbonato cálcico (%) en horizontes superficiales con evidencias de mezcla</b>
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 calcilutitas 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 geoformas, 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 geoformas 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 calcixerólicos o Xerorthents típicos desarrollados en las calcilitas subyacentes o bien Xerochrepts calcixerólicos desarrollados en areniscas incoherentes o conglomerados sin cementar.
- Los suelos más abundantes del Alt Penedès – Anoia son primero los Xerochrepts calcixerólicos 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  $\text{CO}_3\text{Ca}$  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 Publish. 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 Rodríguez, 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. 6<sup>th</sup> 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 economic implications. The mapping and modelling strategies are summarised in Figure 4.1. Most of the works have been addressed either to map the extent 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 extent 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

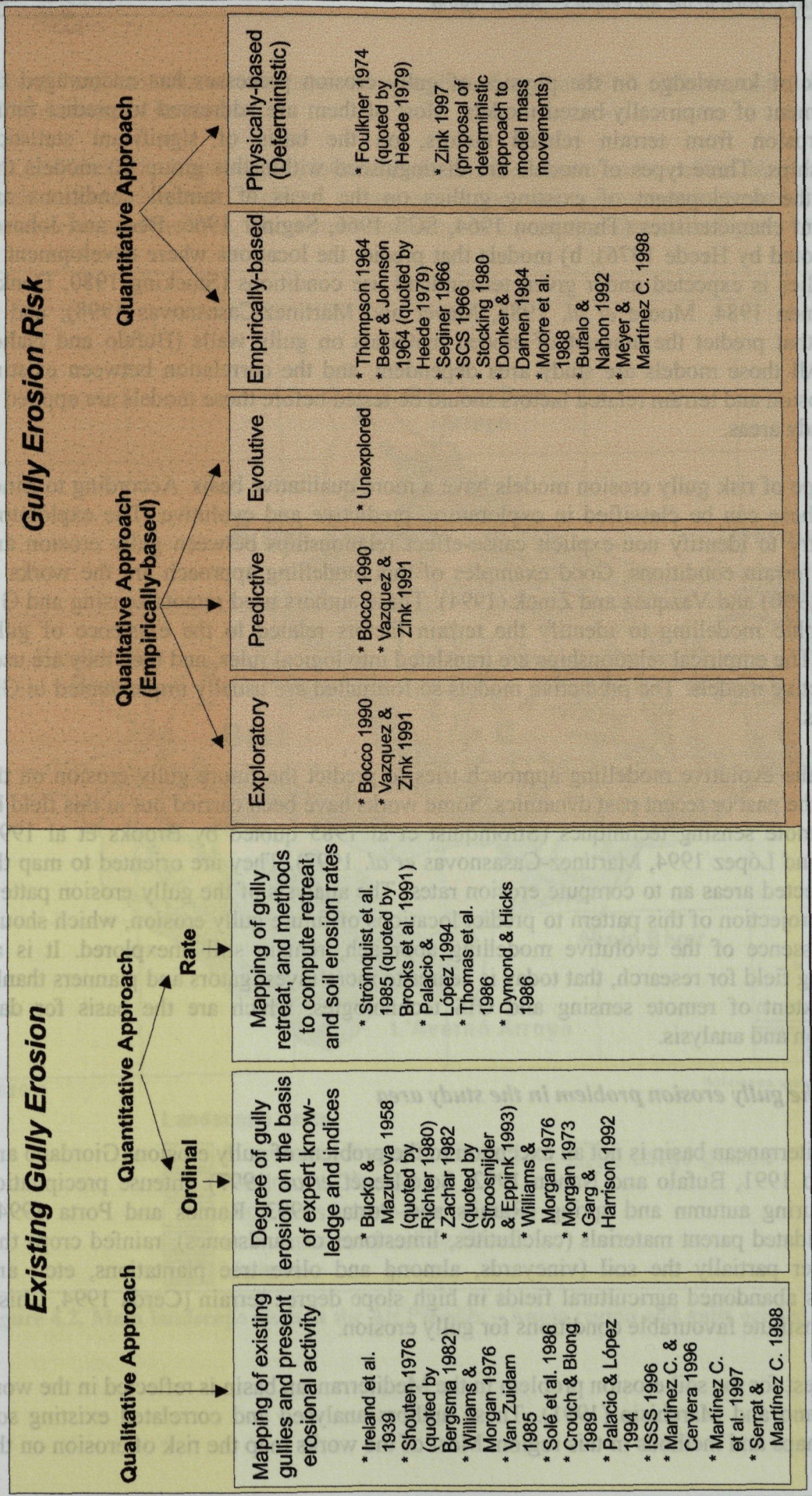


Figure 4.1. Gully erosion mapping and modelling strategies.



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 extent 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.

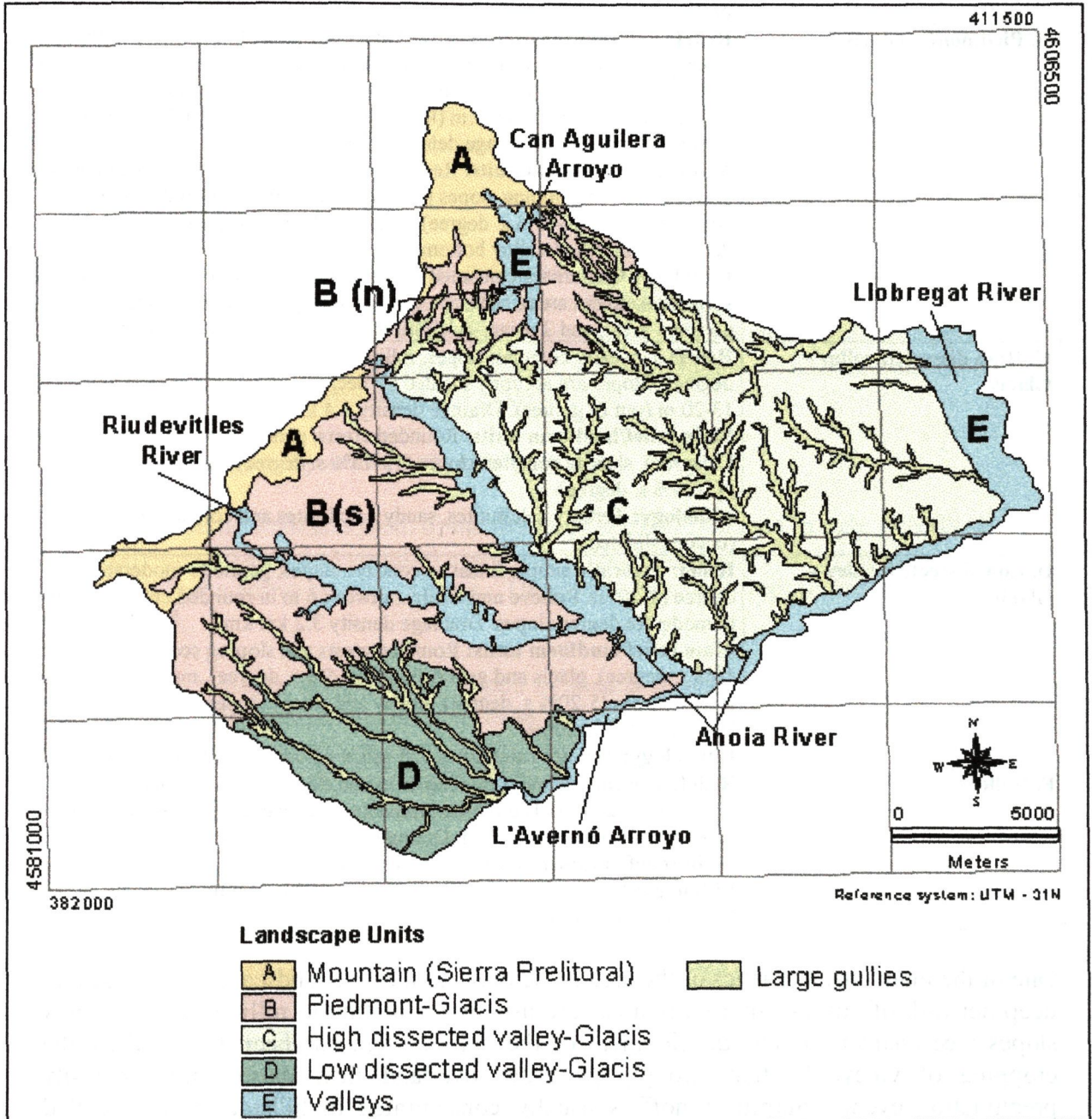


Figure 4.2. Main landscape units in the Alt Penedès – Anoia region and gully eroded areas.

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

Landscape Unit	Main geomorphologic and lithologic characteristics
<b>A. Mountain (Sierra Prelitoral)</b>	<p><b>Relief:</b> Typically steep or very steep terrain (&gt;25% slope degree). Dominance of convex forms. Mean relieve amplitude 41 m. Drainage density 3.4 km km<sup>-2</sup>.</p> <p><b>Main relief/landform units:</b> Steep and very steep slopes (&gt;20% slope degree).</p> <p><b>Lithology:</b> Calcareous rocks (southern part of the area) and Schists (northern part).</p>
<b>B. Piedmont – Glacis</b>	<p><b>Relief:</b> 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<sup>-2</sup>.</p> <p><b>Main relief/landform units:</b> 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><b>Lithology:</b> 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>
<b>C. High dissected valley – Glacis</b>	<p><b>Relief:</b> 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<sup>-2</sup>.</p> <p><b>Main relief/landform units:</b> 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><b>Lithology:</b> Tertiary calcilutites, sandy calcilutites and conglomerates (unconsolidated).</p>
<b>D. Low dissected valley – Glacis</b>	<p><b>Relief:</b> 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<sup>-2</sup>.</p> <p><b>Main relief/landform units:</b> 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><b>Lithology:</b> Tertiary calcilutites and sandy calcilutites (unconsolidated).</p>
<b>E. Valleys</b>	<p><b>Relief:</b> 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<sup>-2</sup>.</p> <p><b>Main relief/landform units:</b> Terraces, flood plains.</p> <p><b>Lithology:</b> 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 – Anoia 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 ArcInfo<sup>TM</sup> 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-Grid<sup>TM</sup> were used, applying a threshold area value of 38 cells to derive the drainage network of the area to the north of the Anoia river and 63 for the area to the south (with different relief types).



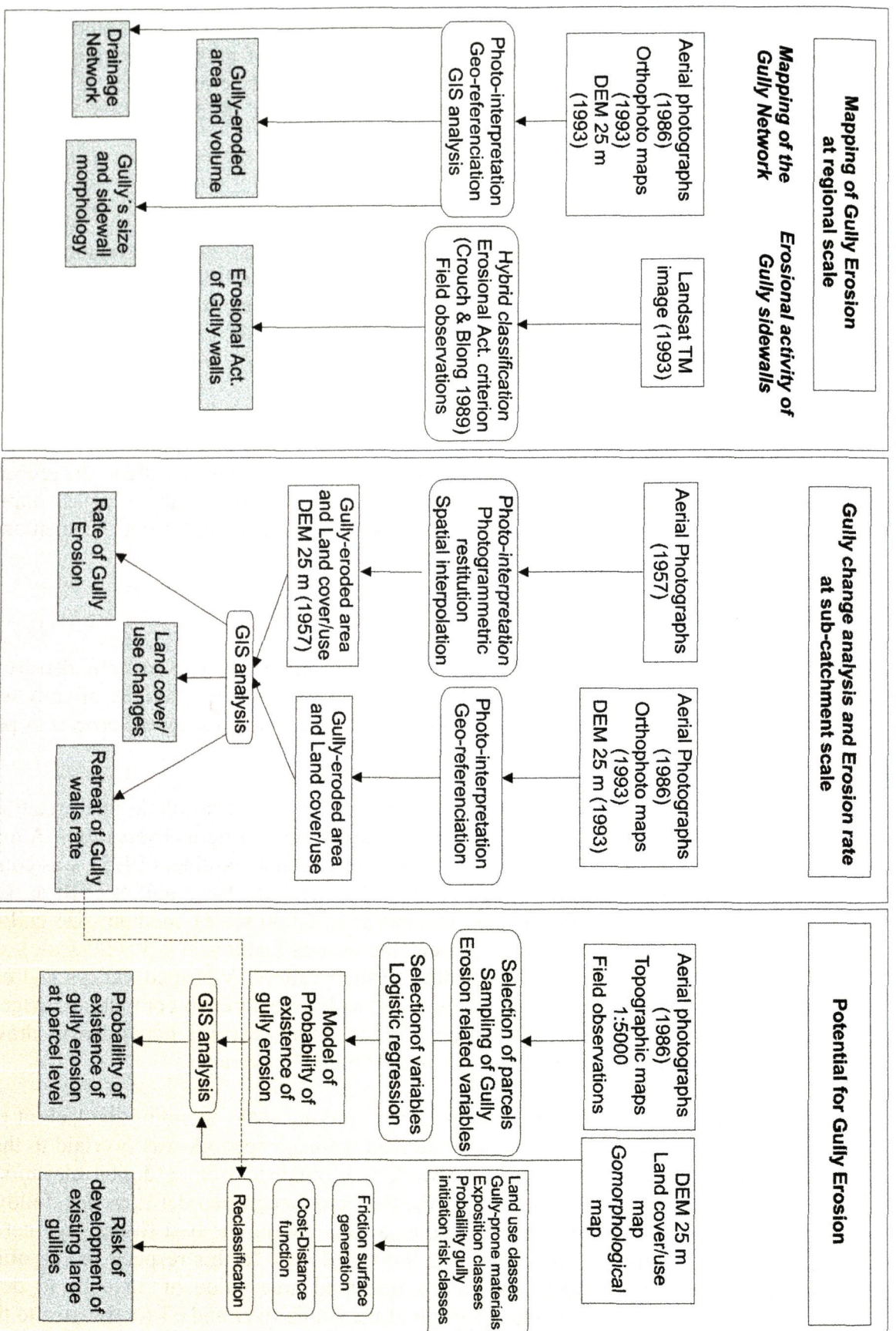


Figure 4.3. Research plan for gully erosion mapping and modelling in the Alt Penedès - Anoia region.

The extent 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.