4.1.2.2.1. Los materiales

El registro sedimentario de este segmento de la Cadena Costera catalana es bastante completo e incluye rocas del Paleozoico, el Mesozoico y el Cenozoico (figura 5).

Paleozoico

Las rocas paleozoicas afloran en la Sierra Litoral, en concreto en el extremo NO del Macizo de Garraf, y constituyen el sustrato de los materiales mesozoicos; también se reconocen en la Sierra Prelitoral, aunque aquí con menor extensión y en una posición estructural anómala debida a la tectónica alpina.

En el Macizo de Garraf la serie paleozoica está formada por series monótonas de alternancias de areniscas y pizarras grises que se atribuyen al Cambro-Ordovícico. Les siguen las pizarras negras características del Silúrico y un tramo de calizas y dolomías con restos de fauna marina (crinoideos y cefalópodos) del Silúrico superior y Devónico inferior. Estos están localmente recubiertos por areniscas y pizarras de color gris verdoso con algunos niveles de microconglomerados de cantos de cuarzo, atribuidas al Carbonífero.

En la Sierra Prelitoral solo afloran las areniscas y pizarras del Cambro-Ordovícico; en ellas se emplazó un pequeño cuerpo de granitoides, de edad Pérmica, que aflora en Vallbona d'Anoia. A su alrededor se formaron corneanas características de la aureola de metamorfismo de contacto.

Mesozoico

El conjunto sedimentario mesozoico aflora en las sierras Litoral y Prelitoral y presenta una serie muy completa que abarca desde el Triásico al Cretácico. En el Macizo de Garraf reposa discordante sobre los materiales paleozoicos, pero en el Gaià la base de la serie mesozoica no aflora.

El Triásico se presenta con sus tres tramos característicos: los niveles inferiores son conglomerados de cantos de cuarzo (70-150 m) seguidos de areniscas cuarzosas y lutitas rojas (90 m) en facies Buntsandstein; estos materiales corresponden a sedimentos de llanura aluvial. Sobre ellos se reconocen un nivel de dolomías grises y claras (75 m), un tramo de areniscas y lutitas rojas (70 m) y un segundo nivel de dolomías grises (100 m) en facies Muschelkalk. Los tramos dolomíticos se interpretan como depósitos de plataforma marina de poca profundidad, mientras que los niveles de areniscas y lutitas rojas corresponden a depósitos de llanura aluvial. A techo de éste conjunto se hallan arcillas y margas abigarradas, localmente con yesos (150 m), típicas de las facies Keuper. Se trata de sedimentos de llanura aluvial y de *sebkha*. Sobre ellos se reconoce localmente un nivel de dolomías tableadas (15 m) que corresponden al techo de la serie triásica (figura 6).

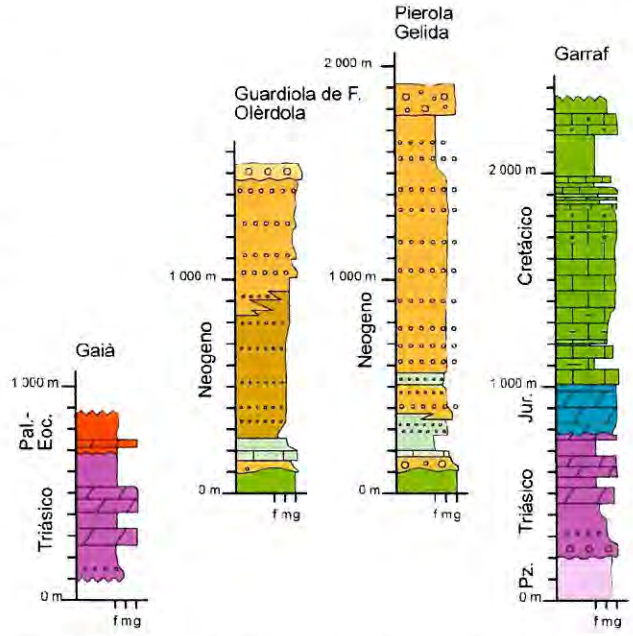


FIGURA 6. Columnas estratigráficas sintéticas del Mesozoico y Cenozoico.

El Jurásico aflora en el Macizo de Garraf y en las sierras de Bonastre y de Montmell, sobre los tramos superiores triásicos. Está constituido por brechas dolomíticas y dolomías grises, en bancos o masivas (250 m) (Fms. Cortes de Tajuña, Cuevas Labradas, les Agulles y superiores de Garraf). Localmente se reconocen las calizas originarias en sectores que no se vieron afectados por la intensa dolomitización, que también obliteró los restos fósiles que permitirían determinar con precisión la edad de éstas dolomías. En conjunto se interpretan como sedimentos de plataforma carbonatada de muy poca profundidad y en ambientes de aguas salobres. Sobre éstas se encuentra el primer nivel de calizas (50 m), parcialmente dolomitizadas (Fm. la Pleta), con abundante fauna y flora fósil, que abarca la parte alta del Jurásico y el inicio del Cretácico. Corresponden a sedimentos de plataforma muy somera, de llanura mareal y de ambientes de aguas salobres.

El Cretácico inferior aflora ampliamente en el Macizo de Garraf, en Montmell y en Bonastre, con espesores que alcanzan los 1.200 m (figura 7). En Garraf, sobre las calizas del tránsito Jurásico-Cretácico se reconoce un tramo de calizas y margas fosilíferas ocres (15 m) depositadas en medios lacustres (Fm. Magraners). Por encima se disponen calizas arenosas y bioclásticas (50 m) con restos de fauna marina (Fm. los Polacos); y sobre ellos se reconoce en Bonastre un nivel de lateritas, que indican un episodio de emersión. La serie continua con un

FIGURA 7. Calizas del Cretácico inferior en el Macizo de Garraf.

tramo de calizas con margas intercaladas, calizas margosas y calizas ricas en restos de fauna marina (650 m) que corresponde a sedimentos lacustres, de plataforma marina de poca profundidad y plataforma marina abierta (Fm. les Artoles). Sobre este conjunto calizo se reconoce un tramo de margas de color gris verdoso con restos de radiolarios y ammonites (250 m) que afloran en el sector central de Garraf (Fm. Vallcarca); son sedimentos propios de cuenca más profunda. A techo tienen un segundo conjunto calizo (100 m), con abundante fauna de plataforma marina (Fm. Pujol Florit). Los niveles más altos del Cretácico inferior sólo afloran en Montmell; se trata de calizas lacustres y arcillas rojas (Fm. Montmell), que indican otro episodio de emersión.

El Cretácico superior está escasamente representado, sólo se reconocen las margas y calizas del Cenomaniense en Montmell (Fm. Can Xuec).

Cenozoico

En esta zona el registro sedimentario cenozoico se divide en dos grupos claramente diferenciados tanto por su edad como por el área de afloramiento: los materiales Paleógenos forman parte del margen oriental de la Cuenca del Ebro y recubren parcialmente la Cadena Costera catalana mientras que los neógenos rellenan las cuencas que se superponen a ésta.

Paleógeno

Las rocas sedimentarias paleógenas afloran exclusivamente en la Sierra Prelitoral, en concreto en las sierras de la Llacuna. Se disponen en discordancia sobre las arcillas del Triásico superior. El área de afloramiento es relativamente reducida en la DO Penedès. El tramo basal está constituido por arcillas rojas con restos de gasterópodos (20-30 m), en las que localmente se reconocen niveles de paleosuelos. Se interpretan como sedimentos aluviales y lacustres y son del Paleoceno; corresponden a la Fm. Mediona. Recubriendo las arcillas hay un tramo de dolomías (30 m) con restos de foraminíferos (Fm. Orpí) que corresponden a sedimentos de plataforma marina muy somera. Los materiales que las recubren son margas y arcillas rojizas, grises o verdosas, de origen aluvial y lacustre, con intercalaciones de calizas lacustres. Están recubiertas por arcillas y lutitas aluviales rojizas con algunas intercalaciones de areniscas y más localmente de yesos. Este conjunto se atribuye al Eoceno y constituye los tramos inferiores del Gr. Pontils. En ésta zona no se han conservado sedimentos paleógenos más recientes.

Neógeno

Los sedimentos neógenos ocupan toda la Depresión del Penedès. El relleno de esta cuenca sedimentaria estuvo condicionado por la actividad de las fallas, la formación de los relieves circundantes, los aportes de la red fluvial y las variaciones del nivel del mar (figura 8). El registro sedimentario neógeno se acumuló sobre las superficies de erosión que se desarrollaron durante el Paleógeno sobre los materiales carbonatados mesozoicos del Macizo de Garraf.

FIGURA 8. Sedimentos neógenos.

En el Penedès los materiales neógenos más antiguos afloran en el margen SE de la depresión y los más recientes en el NO. Los niveles inferiores están adosados y recubren los carbonatos mesozoicos del Macizo de Garraf y del extremo NE de Bonastre; también rellenan las pequeñas depresiones internas, como las del Ordal, Olesa de Bonesvalls, Olivella, Canyelles y Foix. Localmente se conservan restos de los paleosuelos desarrollados sobre las calizas mesozoicas. Los primeros niveles neógenos están formados por brechas heterométricas de bloques y cantos calizos, a las que siguen conglomerados, areniscas y lutitas de un color rojo intenso característico, que se interpretan como depósitos de piedemonte y torrenciales respectivamente; localmente tienen intercalados niveles de calizas lacustres. Este tramo tiene una continuidad lateral irregular y un grosor en superficie de entre 30 y 60 m, que aumenta hacia el NO. En Vilobí, intercalado en los niveles detríticos aluviales rojos se encuentra un nivel de yesos que alcanza 60 m de espesor; se interpretan como depósitos de antiguas sebkhas litorales. Todo éste conjunto constituye el llamado Complejo Continental Inferior y es de edad Aquitaniense y Burdigaliense inferior (Mioceno inferior).

Sobre el Complejo Continental inferior o directamente sobre el sustrato mesozoico se depositó un conjunto de sedimentos de litología y ambientes sedimentarios muy diversos: en los sectores septentrional y occidental de la cuenca se depositaron sedimentos detríticos aluviales; en los márgenes S y SO se formaron calizas de plataforma marina, que reflejan el ascenso del nivel del mar en esta época; en la zona central se acumularon sedimentos detríticos de abanicos litorales y sistemas deltaicos, de bahía y de estuario. La disposición general de estos materiales está reflejada en la figura 9. El conjunto de sedimentos marinos y

de transición también está recubierto parcialmente por sedimentos continentales. Todos los materiales descritos son del Mioceno.

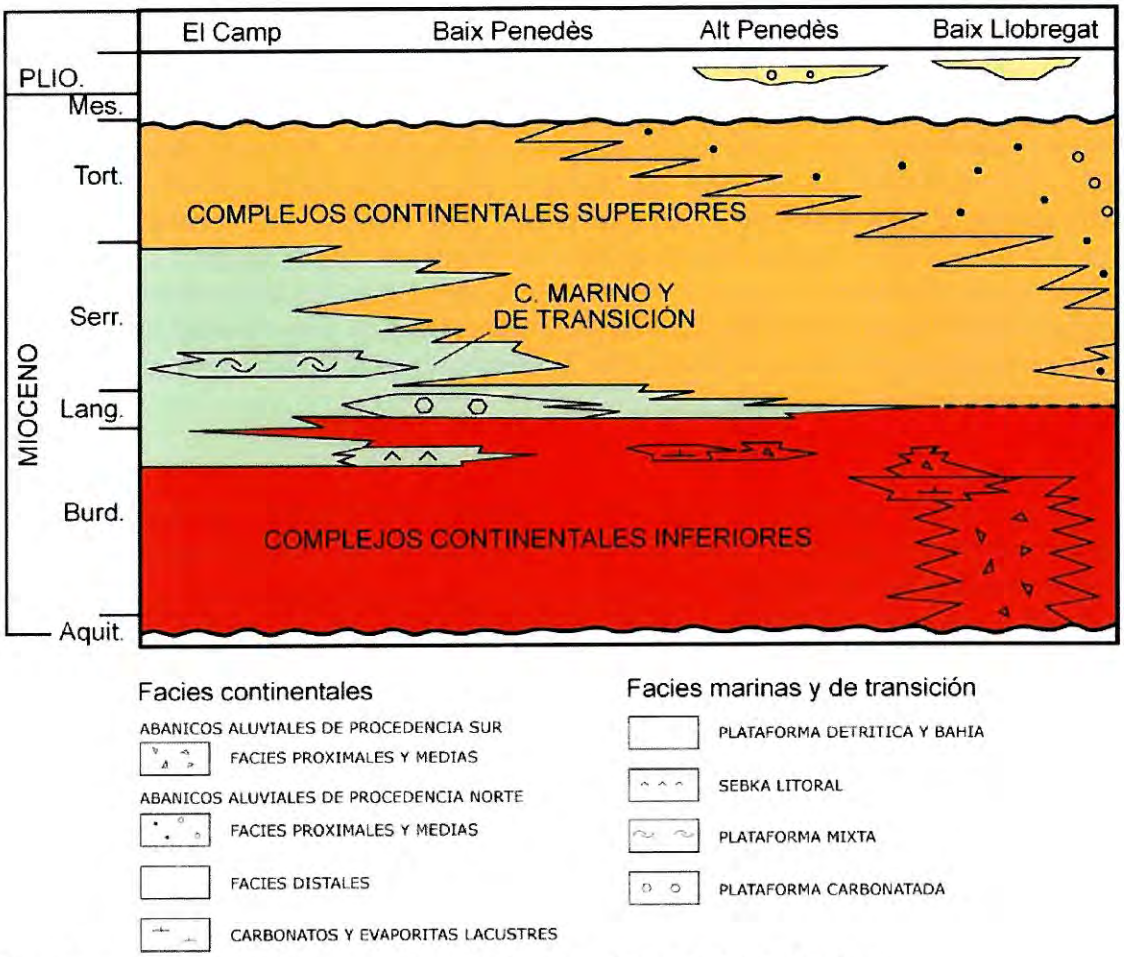


FIGURA 9. Esquema estratigráfico de la cuenca neógena del Penedès (modificado de Cabrera *et al.*, 1991).

FIGURA 10. Calizas arrecifales.

Los materiales del llamado Complejo Marino afloran en el margen NO del Macizo de Garraf y en el extremo NE de la Sierra de Bonastre. Está formado por calizas arrecifales, coralinas y algales, así como por margas y limos ocres o amarillentos entre los que se encuentran niveles de calizas bioclásticas y calcarenitas (figura 10). Afloran, entre otros lugares, en Sant Pau d'Ordal y Sant Miquel d'Olèrdola. El conjunto marino tiene unos 100 m de grosor, que aumenta hacia el SO. Se depositaron en un golfo extenso que ocupaba buena parte de Penedès. Este conjunto está recubierto por sedimentos de plataforma marina detrítica, areniscas, limos y lutitas, de colores grises o rosados, depositados en las zonas sumergidas de los abanicos aluviales costeros y deltas, y que forman el llamado Complejo de Transición. Estos materiales se relacionan lateralmente con los tramos inferiores del Complejo Continental superior (figura 9). Los sedimentos marinos del Penedès son del Langhiense (Mioceno medio) y en las zonas más cercanas a la costa actual posiblemente más recientes (Serravalliense).

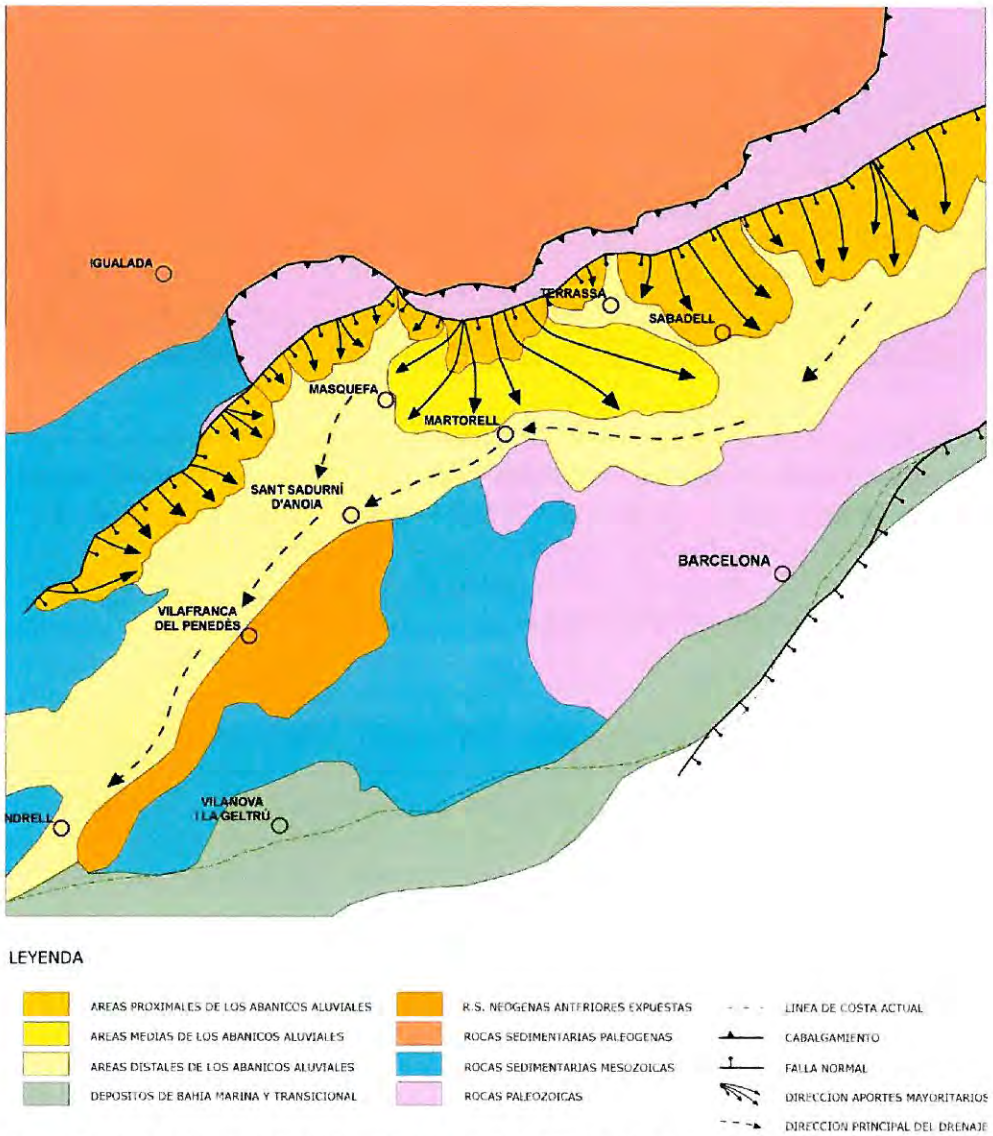


FIGURA 11 Esquema de distribución de los abanicos aluviales del Mioceno medio y superior. De Casanovas-Vilar *et al.*, 2008.

El Complejo Continental superior está formado por un conjunto de abanicos aluviales adosados a la Sierra Prelitoral; se trata de los abanicos de Collbató, els Hostalets de Pierola, y el conjunto de abanicos aluviales coalescentes de Torroelles de Foix (figura 11). En todos ellos se reconocen al NO las facies proximales, en las que predominan los tramos conglomeráticos que difieren en la composición de los cantos; en los tramos medios predominan los niveles de areniscas ocres o rojizas mientras que los tramos distales son predominantemente lutíticos (figura 12), localmente con desarrollo de paleosuelos y niveles lacustres. En la zona de Els Hostalets de Pierola hay yacimientos fosilíferos de gran importancia. El grosor de sedimentos varía de una zona a otra y es aparentemente mayor en el área del abanico de Els Hostalets de Pierola (más de 1.250 m) y más reducida hacia el SO (más de 750 m). Los niveles inferiores se relacionan lateralmente con el complejo de Transición. Todo éste conjunto es del Langhiense, Serravalliense y Tortoniense (Mioceno medio y superior).

Al final del Mioceno, durante el Messiniense, tuvo lugar un descenso muy acusado del nivel del mar y un episodio erosivo muy importante, durante el cual se formaron superficies de erosión y se reconfiguró la red fluvial.

FIGURA 12. Complejo continental superior.

Los depósitos del Plioceno se reconocen en el margen NO de la cuenca del Penedès; se disponen discordantes sobre los materiales miocenos recubriendo la paleosuperficie de erosión mesiniense. Están formados por sucesiones de lutitas, arenas y gravas aluviales de colores rojizos, formando abanicos aluviales de poca extensión. El espesor del conjunto es relativamente reducido, de unos 100 m. Localmente, cerca de la costa actual, se han identificado sedimentos litorales pliocenos.

Los depósitos y las formas erosivas del cuaternario han estado fuertemente condicionados por las oscilaciones del nivel del mar. En el Penedès se diferencian dos dominios, limitados por un umbral que discurre entre las sierras Prelitoral y Litoral, de Guardiola de Fontrubí a la Granada: al NE, los cursos de los ríos de Bitlles, Anoia y el arroyo de Masquefa, afluentes del río Llobregat, y al SO, la cuenca del río Foix y sus afluentes y los arroyos que vierten sus aguas directamente al Mediterráneo.

En el sector septentrional y durante el Pleistoceno medio, se formaron abanicos aluviales relativamente extensos procedentes de la Sierra Prelitoral, entre los que destacan el de Collbató-Esparreguera y el de Piera. Están formados por gravas con matriz arenosa o limosa y lutitas rojizas, con un grado de cementación variable. En el abanico aluvial de Collbató-Esparreguera se desarrollaron horizontes petrocálcicos de grosor métrico. A su vez, y en paralelo al encajamiento de la red fluvial, se formaron hasta 5 sistemas de terrazas fluviales, progresivamente más encajadas. Las más antiguas están formadas por gravas con matriz arenosa en la base que pasan a arenas y limos con niveles de cantos y finalmente a limos ocres a techo de la unidad. A menudo en el tramo superior se reconocen nódulos y horizontes carbonatados. En conjunto corresponden al Pleistoceno medio y superior. Las terrazas inferiores también están formadas por un conjunto detrítico granodecreciente, con gravas, arenas y limos a techo. Se atribuyen al Pleistoceno superior y Holoceno. En todo este sector la red de drenaje está fuertemente encajada, de modo que el sistema de terrazas se dispone en un intervalo topográfico superior a 150 m.

En el sector meridional el desarrollo y encajamiento de la red de drenaje no está tan bien estructurado como en el septentrional. Los diversos sistemas de abanicos aluviales y de terrazas se disponen en un intervalo topográfico inferior a 100 m. Los depósitos cuaternarios ocupan extensiones muy amplias. Están formados por gravas con matriz arenosa y limos, en general de grosor métrico. En conjunto pueden atribuirse al Pleistoceno superior y al Holoceno.

Además de los depósitos detríticos, durante el Cuaternario se formaron acumulaciones de travertinos de considerable extensión en Sant Quintí de Mediona y en Capellades.

4.1.2.2.2. Estructura y evolución geológica

El Sistema Mediterráneo es una unidad de relieve compleja formada por fragmentos de la antigua Cadena Costera catalana cortados por grandes fallas normales que delimitan las fosas neógenas, de tal modo que se reconocen diversas estructuras de distintas edades, que afectan al conjunto Paleozoico, Mesozoico y Paleógeno de la Cadena Costera y a los materiales Neógenos de las fosas.

Los materiales paleozoicos están afectados por las estructuras de plegamiento hercínicas que no se tratará en detalle en esta introducción.

A la orogenia hercínica sucedió un período de emersión y erosión generalizada al final del cual se habían arrasado los relieves formados durante la misma. En discordancia sobre esta paleosuperficie se depositaron las series Triásica y Jurásica, aunque esta última con importantes iatos sedimentarios. Durante el Cretácico inferior el área estuvo ocupada por la zona marginal de una cuenca sedimentaria extensa, posiblemente limitada por un sistema de fallas que separaría el dominio del Gaià, sin registro cretácico, del de Bonastre, Montmell y Garraf, con series del Cretácico inferior muy potentes. Algunas de estas fallas se reactivaron posteriormente. Durante el Cretácico superior toda ésta zona estuvo emergida y sometida a erosión y formación de paleosuelos.

Al inicio del Paleoceno empezaron a acumularse sedimentos en el borde oriental de la Cuenca del Ebro, sobre los materiales triásicos del bloque del Gaià.

Durante el Paleógeno, en el contexto tectónico transpresivo alpino, se formaron las estructuras que definen la Cadena Costera Catalana. Se trata de un conjunto de pliegues, fallas inversas y cabalgamientos que afectaron a los materiales paleozoicos y mesozoicos y, parcialmente, a los sedimentos paleógenos pretectónicos y a los coetáneos a la deformación. Estas estructuras discurrían cerca del límite oriental de la Cuenca del Ebro. En la Sierra Prelitoral se reconocen pliegues en dirección NE-SO, sistemas de fallas de salto en dirección y pequeñas láminas cabalgantes que corresponden a este episodio deformativo.

La configuración paleogeográfica era radicalmente distinta a la actual: los materiales mesozoicos que forman actualmente el substrato de la cuenca del Penedès (Bonastre y Montmell y el Garraf) constituían un solo bloque elevado con el del Gaià, que cabalgaba al margen de la cuenca del Ebro, donde se depositaban los sedimentos detríticos producto de la erosión de este antiguo macizo. Estos materiales tienen su mejor representación en los conglomerados de Montserrat y de Montclar. Los vestigios de la estructura compresiva alpina se reconocen en el límite SE de la Sierra Prelitoral: son el conjunto de pliegues del Gaiá, la falla de salto en dirección siniestra de Torres y las láminas cabalgantes de materiales paleozoicos de El Bruc, así como otras menores.

Pero tanto la morfología como la distribución de materiales que se reconoce actualmente en el área de la DO Penedès son el resultado del último episodio deformativo, de edad neógena, que se superpone a las estructuras anteriores. Desde finales del Paleógeno esta zona ha estado sometida a un régimen tectónico extensivo, relacionado con la abertura del Golfo de Valencia, que comportó la formación de las fallas normales en dirección NE-SO con los bloques SE hundidos. Estas fallas delimitan las semifosas y las cuencas sedimentarias que se desarrollaron y rellenaron parcialmente desde el Mioceno hasta la actualidad.

En esta zona se formó la falla del Penedès, que se superpone y aprovecha parcialmente la anterior falla paleógena. Esta estructura tiene un salto de falla superior a los 1.000 metros y limita la Sierra Prelitoral de la Depresión del Penedès. El hundimiento ocurrió mayoritariamente durante el Mioceno.

El sustrato mesozoico de la D.O. Penedès también está afectado por numerosas fallas sintéticas y antitéticas que a grandes rasgos son paralelas a la Falla del Penedès, aunque de menor salto. En la Depresión del Penedès se reconocen en los altos de Pacs y de Vilobí, donde afloran los materiales mesozoicos del substrato; en la zona de Gelida y Sant Sadurní d'Anoia, el límite SE de la cuenca está localmente fallado y en el Macizo de Garraf hay un sistema de fallas que delimitan pequeñas cuencas neógenas intramontañosas y la cuenca de Vilanova. También se reconocen fallas en dirección NO-SE como la de Vallcarca, en Garraf.

4.1.2.3. Vegetación

La DO Penedès se sitúa en el dominio del encinar calcícola y de la maquia. El dominio del encinar litoral (*Quercetum ilicis galloprovinciale*) impera en la mayor parte del sector central, excepto en las áreas más costeras e interiores, donde se presentan diferentes variantes, más enriquecidas en carrasca (*Quercus ilex subsp. Ballota*). Sin embargo, las características de los suelos hacen que este dominio sea hipotético, y que los pinares de pino carrasco sean las únicas formaciones forestales que se puedan esperar (figura 13).

El dominio de la maquia de coscoja y palmito (*Querco-Lentiscetum*) abarca toda el área costera que arranca en el Macizo de Garraf, pasado el río Llobregat, y cubre las zonas más llanas y las laderas litorales por debajo de los 100-200 m.

La agricultura ha transformado de forma patente toda el área, de forma que ninguna zona accesible se ha escapado a su influencia. Además de los importantes núcleos de población e industria (Vilafranca del Penedès, Vilanova i la Geltrú y el Vendrell), el litoral ha experimentado un fuerte desarrollo con la actividad turística, promoviendo una urbanización dispersa en todo el territorio y, a menudo, caótica y desordenada.

FIGURA 13. Vegetación típica del Penedès.

Otro elemento destructor de máxima importancia ha sido el fuego forestal. A partir de la década de los setenta, el número e intensidad de los incendios ha aumentado, hasta el punto que podemos considerar que la práctica totalidad del área forestal situada por debajo de los 1.000 m ha resultado más o menos dañada.

El pinar de pino carrasco (*Pinus halepensis*) es la formación forestal más importante de la vegetación actual. Constituye, desde masas densas que son verdaderos bosques mixtos de pino y encina o de pino y carrasca, hasta poblaciones dispersas que apenas llegan a recubrir la superficie del suelo. El caso más común, sin embargo, es encontrarnos un matorral calcícola con un estrato arbóreo de pino carrasco.

Los bosques planifolios presentan un papel mucho menos destacado. No obstante, todavía se pueden encontrar algunas muestras de encinares y carrascales en las partes bajas de Montserrat y en algún sector poco accesible.

La maquia litoral de coscoja y palmito prácticamente ha desaparecido del territorio y ha sido substituida por una vegetación arbustiva de romero, brezo y tomillo o, simplemente, por cultivos y edificaciones. No obstante, a lo largo de todo el litoral de la costa del Garraf, quedan algunas áreas relictas.

La vegetación hidrofítica no presenta mucha importancia paisajística en la zona. Los torrentes permanecen secos la mayor parte del año y dan lugar a comunidades riparias perennifolias, como las formaciones de adelfas. Los restos del bosque de ribera que aparecen en el área de la DO Penedès corresponden a alamedas (*Vinco-Populetum albae*).

La agricultura ocupa las zonas llanas y las laderas más suaves, aunque en épocas de escasez o de gran demanda, incluso las laderas con más pendiente fueron abancaladas o aterrazadas para su uso. Domina con gran diferencia la viña, pero también encontramos algo de olivo, almendro, algarrobo, cereal de invierno y frutales.

Como vegetación arvense encontramos las comunidades anuales de rabaniza blanca (*Diplotaxietum erucoidis*), bien en su variante típica con lechetrezna de campo o, en casos de máxima nitrificación, con cenizos, amarantos, ortigas y cardos.

4.1.2.4. Usos del territorio

La agricultura tiene una fuerte implantación en la DO Penedès, favorecida por las condiciones naturales favorables: topografía plana en gran parte del territorio, buen clima y suelos de buena calidad (figura 14).

La viña ocupa actualmente unas 26.500 ha en el área geográfica de la DO Penedès, con unas densidades de 2.300 a 3.000 cepas por hectárea; sin embargo, algunas variedades emparradas como Chandonnay o Pinot Noir llegan a densidades de hasta 5.000. El paso de los cultivos tradicionales, como el cereal y el olivo, a la plantación de viña se acentuó a mediados del siglo XIX, con los problemas provocados por la filoxera en Francia. Las variedades blancas más cultivadas son Macabeo, Parellada, Xarelo y Chardonnay. Por lo que respecta a las variedades negras destacan Garnacha, Tempranillo, Merlot, Cabernet-Sauvignon y Pinot Noir. Este cultivo se dedica a la producción de vinos de alta calidad y cavas bajo las normas de sus respectivas denominaciones de origen, Penedès y Cava.

FIGURA 14. Agricultura en el Penedès.

El segundo cultivo en extensión es el cereal, con unas 9.000 ha. Se concentra en los municipios más septentrionales y ocupa suelos más bien pobres; actualmente se encuentra en retroceso. En los terrenos frescales alternan frutales, básicamente melocotonero, con olivos y almendros. El resto de cultivos de secano tienen, con alguna excepción, una presencia puramente testimonial.

La DO Penedès ha experimentado en las últimas décadas una pérdida constante de explotaciones. Aproximadamente, un 57% de estas explotaciones son inferiores a 10 ha, un 20% tienen entre 5 y 10 ha, un 6% entre 20 y 50, un 2% entre 50 y 100 ha, y un 2% más de

100 ha. La estructura del régimen de tenencia de la tierra se fundamenta en el cultivo directo (65%) y la aparcería (30%).

El grado de mecanización del campo es elevado; aunque teniendo en cuenta el predominio de explotaciones pequeñas, la potencia de la maquinaria parece sobredimensionada.

La importancia de la ganadería es moderada en la zona. Como comarca mediterránea típica, en la DO Penedès el sector ganadero se centra en la producción de los animales más adaptados a la estabulación y menos ligados a prados, pastos o forrajes, como es el caso del sector avícola, con más de 3.000.000 cabezas, principalmente de engorde, y del sector porcino.

La industria tiene una larga tradición en la DO Penedès, favorecida por un conjunto de factores como la buena situación respecto a las comunicaciones, la disponibilidad de agua (ríos Anoia y de Bitlles), proximidad a los mercados consumidores y exportadores, buenas condiciones del terreno por lo que refiere a la producción de excedentes agrarios que se utilizan como materia de transformación, etc. En este sentido, la orientación de la agricultura en la DO Penedès hacia el cultivo de la viña ha permitido que se desarrollara y se consolidara un sector fundamental: la agroindustria de la elaboración y transformación del vino y el cava (figura 15).. Algo más del 50% de la producción se dedica al cava, mientras que el resto se desglosa entre el vino envasado (35%) y la venta a granel (15%). El peso específico de esta industria vitivinícola en el zona es muy importante, llegando a representar más del 20% de las empresas y del 30% de los trabajadores ocupados.

En el litoral la pesca queda reducida a una actividad testimonial, casi desprovista de significación económica. Tan sólo en el entorno de los puertos de Vilanova i la Geltrú y Sitges podemos decir que se centra una ocupación pesquera significativa, que equivale aproximadamente al 10% de la producción del litoral catalán.

Los aprovechamientos mineros en la zona de la DO Penedès son muy específicos ya que hay una gran explotación del subsuelo provocado por su propia naturaleza y por la cercanía al área metropolitana de Barcelona. Son numerosas las canteras de caliza, principalmente en la zona litoral y septentrional, y también se puede destacar la explotación de carbonato cálcico para la fabricación de cemento.

FIGURA 15. Bodegas de elaboración de vinos y cavas.

El turismo tiene una importancia capital en las zonas cercanas al litoral hasta el punto de ser considerada, en algunas zonas, la actividad económica principal. Esta actividad se basa en un tipo de turismo de segunda residencia, lo que ha hecho proliferar durante años un gran número de urbanizaciones más o menos ordenadas, con los beneficios económicos correspondientes y las problemáticas ligadas a la necesidad de proporcionar servicios y equipamientos por parte de los ayuntamientos.

El intenso impacto que ha sufrido el Macizo de Garraf (canteras abandonadas, urbanizaciones y vertederos más o menos legalizados, incendios...) y su cercanía a la gran área metropolitana de Barcelona, hicieron plantear en su momento la necesidad de dotar a las Montañas de Garraf de un plan especial de protección. En este sentido, el 30 de julio de 1986, el *Departament de Política Territorial i Obres Públiques* de la Generalitat de Cataluña aprobó, definitivamente, un plan especial para la zona (Parque Natural del Garraf, 10.638 ha). Este plan responde a diferentes objetivos: por una parte presenta una actitud restauradora, ya que considera las graves consecuencias de algunas de las actividades que han tenido lugar en el parque; por otra, propone un régimen que intenta hacer posible un dialogo racional entre el territorio y las necesidades de la sociedad actual, sin olvidar que este territorio soporta todavía algunas actividades productivas y económicas.

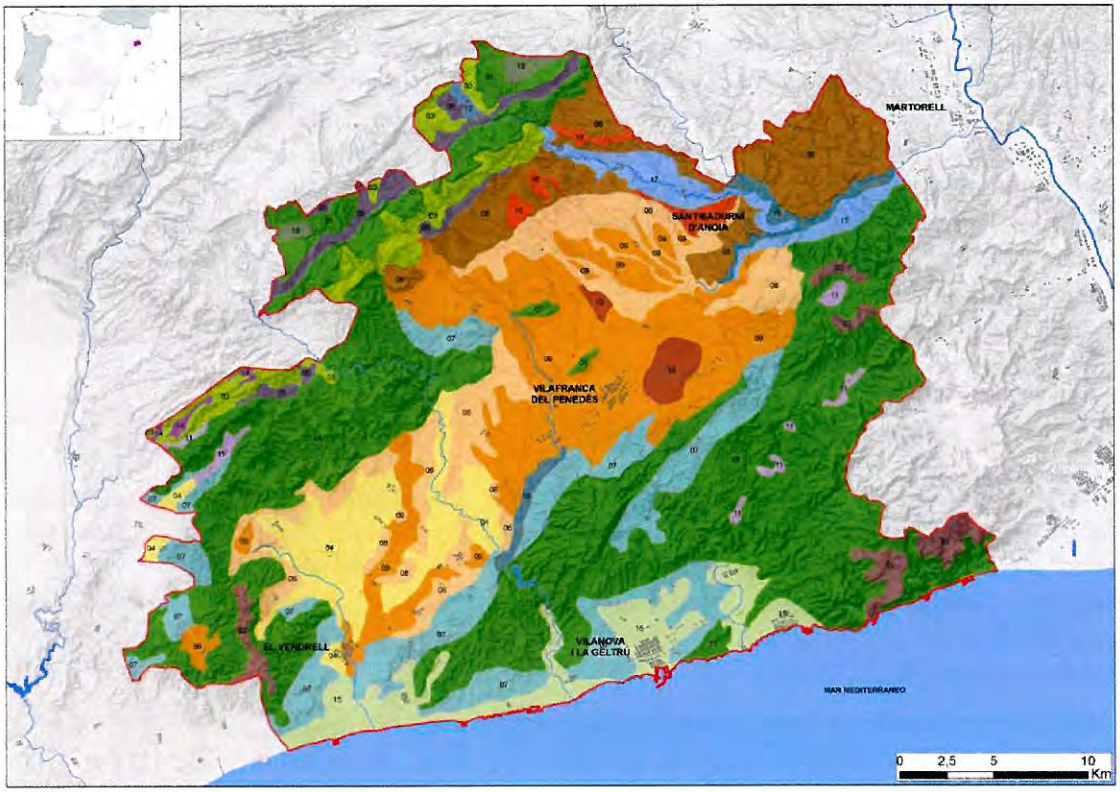
4.1.3. Tipos de suelos de la D.O. Penedès

La interacción de los factores analizados previamente proporciona una importante diversidad edáfica. El "Mapa de sòls 1:250.000 de las comarques de l'Alt Penedès, Baix Penedès i Garraf" (figura 16), obtenido a partir del "Mapa de sòls 1:25.000 de l'àmbit geogràfic de la D.O. Penedès", destaca los 17 tipos de suelos que componen las asociaciones de suelos que presentan una mayor distribución en la zona. Estos tipos de suelos se presentan clasificados a nivel de suborden (SSS, 1999).

En la denominación de los horizontes genéticos se sigue la propuesta que en su día efectúo el grupo de trabajo "Nomenclatura d' Horitzons de Sòls" de la Sección de Suelos de la "Institució Catalana d'Estudis Agraris (ICEA)" y la Delegación Territorial de la SECS en Cataluña. Esta nomenclatura fue adopta-da, en su día, por la "Secció de Sòls i Fertilitzants" del DAAM y se mantiene en los trabajos de cartografía de suelos que se están llevando a cabo actualmente en Cataluña.

El aspecto más relevante de esta propuesta, por lo que se refiere a los suelos de la DO Penedès, es el uso de la letra **"n"** (en lugar de **"c"**) para indicar la presencia de acumulaciones secundarias de carbonato cálcico en forma de nódulos.

Otro aspecto a destacar en este capítulo, es el uso de un paréntesis para indicar que un horizonte o una característica del suelo, puede aparecer o no, en los perfiles que presenta un determinado tipo de suelo.



Leyenda

Asociaciones de suelos

1 Xerorthent lítico (Superficial/Calizas y dolomías) y de afloramientos rocosos de caliza
2 Xerorthent lítico (Superficial/Calizas y dolomías), afloramientos rocosos de caliza y de Haploxeralf lítico-rúptico (Superficial/Calizas y dolomías)
3 Xerorthent lítico (Superficial/Calizas y dolomías) y de Xerorthent típico (Superficial/Lutitas y arenitas)
4 Calcixerept petrocálcico (Superficial/Petrocálcico) y de Calcixerept típico (Muy profundo/Detríticos terrígenos)
5 Xerorthent típico (Mod. profundo/Lutitas y arenitas), Haploxerept cálcico (Profundo/Lutitas y arenitas) y de Haploxerept fluvéntico (Muy profundo/Detríticos terrígenos)
6 Xerorthent típico (Mod. profundo/Lutitas y arenitas), Haploxerept cálcico (Profundo/Lutitas y arenitas) y de Calcixerept típico (Muy profundo/Detríticos terrígenos)
7 Xerorthent lítico (Superficial/Calizas), Calcixerept petrocálcico (Mod. profundo/Petrocálcico) y de Haploxerept cálcico (Mod. profundo/Calizas)
8 Xerorthent típico (Mod. profundo/Lutitas y arenitas), Haploxerept cálcico (Mod. profundo/Gravas calizas) y de Calcixerept típico (Muy profundo/Detríticos terrígenos)
9 Calcixerept petrocálcico (Mod. profundo/Petrocálcico), Calcixerept típico (Muy profundo/Detríticos terrígenos) y de Haploxerept fluvéntico (Muy profundo/Detríticos terrígenos)
10 Calcixerept típico (Muy profundo/Detríticos terrígenos), Calcixerept petrocálcico (Mod. profundo/Petrocálcico) y de Haploxeralf cálcico (Muy profundo/Detríticos terrígenos)
11 Haploxerept cálcico (Mod. profundo/Calizas y dolomías), Haploxerept fluventico (Muy profundo/Detríticos terrígenos) y de Xerorthent lítico (Superficial/Calizas y dolomías)
12 Calcixerept típico (Muy profundo/Gravas calizas), Haploxerept fluvéntico (Muy profundo/Detríticos terrígenos) y de Xerorthent típico (Superficial/Lutitas y arenitas)
13 Xerorthent típico (Mod. profundo/Lutitas y arenitas), Haploxerept cálcico (Mod. profundo/Calizas) y de Xerorthent lítico (Superficial/Calizas)
14 Haploxerept cálcico (Profundo/Lutitas y arenitas), Haploxerept fluvéntico (Muy profundo/Detríticos terrígenos) y de Xerorthent típico (Superficial/Lutitas y arenitas)
15 Calcixerept típico (Muy profundo/Detríticos terrígenos), Calcixerept petrocálcico (Mod. profundo/Petrocalcico) y de Haploxerept fluvéntico (Muy profundo/Detríticos terrígenos)
16 Calcixerept petrocálcico (Superficial/Petrocálcico) y de Palexeralf petrocálcico (Mod. profundo/Petrocálcico)
17 Haploxerept fluvéntico (Muy profundo/Gravas calizas), Calcixerept típico (Muy profundo/Detríticos terrígenos) y de Haploxeralf cálcico (Muy profundo/Detríticos terrígenos)
18 Xerofluvent típico (Muy profundo/Gravas calizas) y de Haploxerept fluvéntico (Muy profundo/Detríticos terrígenos)

FIGURA 16. Mapa de suelos 1:250.000 de las comarcas del Alt Penedès, Baix Penedès y Garraf.

4.1.3.1. Xerorthents líticos

Estos suelos son poco profundos (<40 cm), bien drenados y de texturas medianas, con bastantes (5-35%) elementos gruesos. Se han desarrollado a partir de materiales procedentes de la meteorización de las calizas y/o dolomías. Se encuentran distribuidos en las divisorias, vertientes fuertes y vertientes moderadas de las sierras Litoral y Prelitoral, donde ocupan unas 31.000 ha (32% de la superficie total).

Presentan poco desarrollo edáfico. La secuencia típica de horizontes es,

A-(Bw)-R (caliza/dolomía).

El horizonte A tiene un espesor de unos 20 cm. El color (húmedo) es de castaño oscuro a marrón (10YR 4/3 - 7,5YR 4/4). La textura es media y presenta bastantes (5-35%) elementos gruesos. El pH es moderadamente básico (8,1-8,5), el contenido de carbonato cálcico equivalente es de alto a muy alto (30-50%) y el de materia orgánica medio (2-5%).

El horizonte Bw, cuando aparece, no llega más allá de los 40 cm de profundidad. Su color (húmedo) es de castaño oscuro a marrón (10YR 4/3 - 7,5YR 4/6). La textura es media y presenta bastantes (5-35%) elementos gruesos. El pH es moderadamente básico (8,0-8,4) y el contenido de carbonato cálcico equivalente es de alto a muy alto (30-50%).

Por debajo aparece la roca caliza R, frecuentemente fragmentada, y que puede presentar pequeños recubrimientos formados por la disolución y la recristalización del carbonato cálcico de la misma roca.

Se clasifican como Xerorthent lítico (SSS, 1999) y Leptosol háplico (calcárico) (WRB, 2006).

FIGURA 17. Xerorthent lítico. Perfil tipo y área de distribución.

4.1.3.2. Xerorthents típicos (poco profundos)

Estos suelos son poco profundos (<40 cm), bien drenados y de textura mediana, con pocos (5-15%) elementos gruesos. Se han desarrollado sobre lutitas o areniscas. Se encuentran distribuidos en las vertientes fuertes y moderadas de la Sierra Prelitoral, donde ocupan unas 1450 ha (1,5% de la superficie total).

Presentan poco desarrollo edáfico. La secuencia típica de horizontes es,

A(p)-C (lutita/arenisca).

El horizonte A tiene un espesor de 20 a 40 cm. Su color (húmedo) es de marrón rojizo a marrón pálido (5YR 4/4 - 10YR 5/8). La textura es media y presenta pocos (1-5%) elementos gruesos. El pH es moderadamente básico (8,1-8,5), el contenido de carbonato cálcico equivalente es de alto a muy alto (30-50%) y el de materia orgánica de bajo a medio (1-5%).

Por debajo encontramos un contacto paralítico C, lutita o arenita.

Se clasifican como Xerorthent típico (SSS, 1999) y Regosol háplico (calcárico) (WRB, 2006).

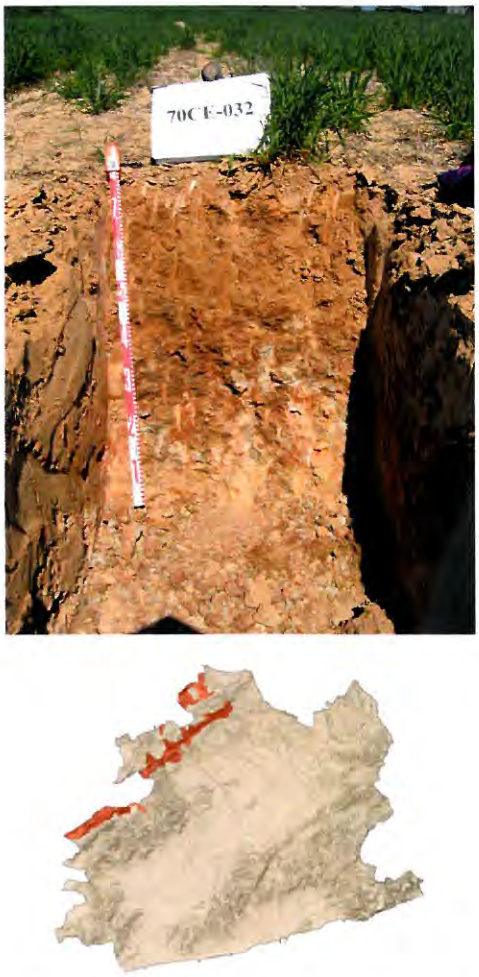


FIGURA 18. Xerorthents típicos (poco profundos). Perfil tipo y área de distribución.

4.1.3.3. Xerorthents típicos (moderadamente profundos)

Estos suelos son moderadamente profundos (40-80 cm), bien drenados y de textura media a moderadamente gruesa, con pocos (1-5%) elementos gruesos. Se han desarrollado a partir de lutitas o areniscas en las vertientes moderadas de la Sierra Prelitoral y de la Depresión del Penedès, donde ocupan unas 8.500 ha (9% de la superficie total).

Presentan poco desarrollo edáfico. La secuencia típica de horizontes es,

A(p)-Bw-C (lutita/arenisca).

El horizonte Ap tiene un espesor de 20 a 30 cm. El color (húmedo) es de castaño a marrón (7,5YR 4/3 - 10YR 5/4). La textura es media y presenta pocos (1-5%) elementos gruesos. El pH es de moderadamente básico a ligeramente alcalino (8,3-8,7), el contenido de carbonato cálcico equivalente es de alto a muy alto (30-40%) y el de materia orgánica bajo (1-2%).

El horizonte Bw alcanza los 60-80 cm de profundidad. Su color (húmedo) es de castaño claro a marrón (7,5YR 5/8 - 10YR 6/6). La textura es de media a moderadamente gruesa y presenta pocos (1-5%) elementos gruesos. El pH es de moderadamente básico a ligeramente alcalino (8,3-8,8) y el contenido de carbonato cálcico equivalente de alto a muy alto (30-40%).

Por debajo encontramos un contacto paralítico C, lutita o arenita.

Se clasifican como Xerorthent típico (SSS, 1999) y Regosol háplico (calcárico) (WRB, 2006).

FIGURA 19. Xerorthents típicos (moderadamente profundos). Perfil tipo y área de distribución.

4.1.3.4. Xerofluvents típicos

Estos suelos son muy profundos (>120 cm), bien drenados y de textura media a moderadamente gruesa, con algunos (5-15%) elementos gruesos. Son suelos desarrollados sobre materiales detríticos terrígenos en las terrazas de la Depresión del Penedès, donde ocupan unas 800 ha (1% de la superficie total).

Presentan poco desarrollo edáfico. La secuencia típica de horizontes es,

Ap-Bw.

El horizonte Ap tiene un espesor de unos 20 cm. El color (húmedo) es de marrón a castaño (10YR 5/4 - 7,5YR 4/4). La textura es media y presenta pocos (1-5%) elementos gruesos. El pH es moderadamente básico (8,1–8,5), el contenido de carbonato cálcico equivalente es de moderadamente alto a alto (20-40%) y el de materia orgánica es bajo (1-2%).

Diferentes horizontes Bw van alternándose hasta profundidades superiores a los 120 cm. Su color (húmedo) es de marrón a castaño (10YR 4/6 - 7,5YR 4/4). La textura es de media a gruesa y presenta algunos (5-15%) elementos gruesos. El pH es de mode-radamente básico a ligeramente alcalino (8,1 – 8,7) y el contenido de carbonato cálcico equivalente es moderadamente alto (20-30%).

Se clasifican como Xerofluvent típico (SSS, 1999) y Fluvisol háplico (calcárico) (WRB, 2006).

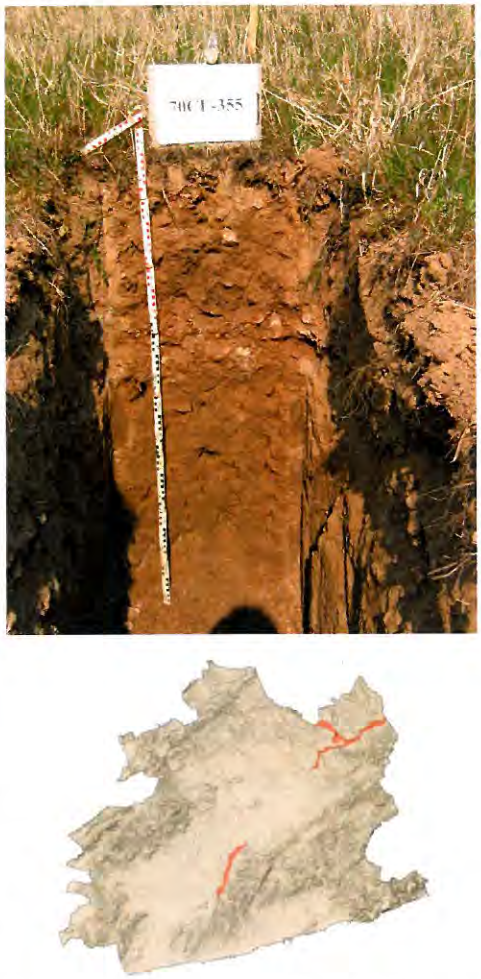


FIGURA 20. Xerofluvents típicos. Perfil tipo y área de distribución.

4.1.3.5. Haploxerolls líticos

Estos suelos son poco profundos (<40 cm), bien drenados y de textura media, con bastantes (5-35%) elementos gruesos. Se han desarrollado sobre materiales procedentes de la meteorización de las rocas calizas y/o dolomías en las plataformas, divisorias y vertientes fuertes de la Sierra Prelitoral, donde aparecen como inclusiones y ocupan unas 150 ha (0,1% de la superficie total).

El perfil presenta un horizonte móllico, caracterizado por unos contenidos elevados de materia orgánica, unos colores oscuros, una buena estructura y una saturación de bases superior al 50%. Estos suelos son conocidos como "terra bruna". La secuencia típica de horizontes es,

Oe-A-(Bw)-R (caliza).

El horizonte orgánico Oe tiene un espesor de 2 a 4 cm y es producto de la descomposición de restos vegetales;.

El horizonte A tiene un espesor de unos 20 cm. El color (húmedo) es castaño oscuro (7,5YR 3/3). La textura es media y presenta bastantes (5-35%) elementos gruesos. El pH es moderadamente básico (8,1–8,5), el contenido de carbonato cálcico equivalente moderadamente alto (30-40%) y el de materia orgánica abundante (5-10%).

El horizonte Bw, cuando está presente, tiene un espesor de menos de 20 cm. Su color es marrón (7,5YR 4/4). La textura es de media a moderadamente fina y presenta bastantes (5-35%) elementos gruesos. El pH es moderadamente básico (8,1–8,5) y el contenido de carbonato cálcico equivalente de moderadamente alto a alto (20-40%).

A continuación encontramos la roca caliza, horizonte R.

Se clasifican como Haploxeroll lítico (SSS, 1999) y Leptosol mólico (calcárico) (WRB, 2006).

FIGURA 21. Haploxerolls líticos. Perfil tipo y área de distribución.

4.1.3.6. Haploxerepts cálcicos (moderadamente profundos)

Estos suelos son moderadamente profundos (60-80 cm), bien drenados y de texturas medias, con bastantes (5-35%) elementos gruesos. Se han desarrollado sobre sedimentos detríticos terrígenos en las vertientes aterrazadas de pendiente moderadas, en las vertientes suaves y en los fondos de valle de las sierras Litoral y Prelitoral, donde ocupan unas 2.500 ha (2,5% de la superficie total).

El perfil presenta acumulaciones secundarias de carbonato cálcico en forma de pseudomicelios o pequeños nódulos que dan lugar a un horizonte cámbico. La secuencia típica de horizontes es,

A(p)-Bwk(n)-R (caliza).

El horizonte A(p) tiene un espesor de unos 20 cm. El color (húmedo) es marrón (10YR 4/4 – 10YR 5/4). La textura es media y presenta algunos (5-15%) elementos gruesos. El pH es moderadamente básico (8,2-8,5), el contenido de carbonato cálcico equivalente es de alto a muy alto (30-50%) y el de materia orgánica medio (2-5%).

El horizonte Bwk(n) alcanza los 60-80 cm de profundidad. Su color (húmedo) es marrón (10YR 5/4). La textura es media y presenta bastantes (5-35%) elementos gruesos. El pH es de moderadamente básico a ligeramente alcalino (8,4-8,7) y el contenido de carbonato cálcico equivalente es muy alto (>40%). Presenta acumulaciones secundarias (1-5%) de carbonato cálcico en forma de pseudomicelios, o nódulos pequeños, que dan lugar a un horizonte cámbico.

Por debajo aparece la roca caliza R, frecuentemente fragmentada, y que puede presentar pequeños recubrimientos formados por disolución y recristalización del carbonato cálcico de la misma roca.

Se clasifican como Haploxerept cálcico (SSS, 1999) y Cambisol léptico (calcárico) (WRB, 2006).

FIGURA 22. Haploxerepts cálcicos (moderadamente profundos). Perfil tipo y área de distribución.

4.1.3.7. Haploxerepts cálcicos (moderadamente profundos y esqueléticos)

Estos suelos son moderadamente profundos (60-80 cm), bien drenados y de texturas medias a gruesas, con abundantes (>35%) elementos gruesos. Se han desarrollado sobre sedimentos detríticos terrígenos con gravas en las áreas más elevadas de la Depresión del Penedès, donde ocupan unas 2.500 ha (2,5% de la superficie total).

El perfil presenta acumulaciones secundarias de carbonato cálcico en forma de revestimientos de los elementos gruesos, dando lugar a un horizonte cámbico. La secuencia típica de horizontes es,

A(p)-Bk(gravas)-C (lutita/arenisca).

El horizonte A(p) tiene un espesor de unos 20-30 cm. El color (húmedo) es marrón (10YR 4/4). La textura es de media a gruesa y presenta bastantes (5-35%) elementos gruesos. El pH es de moderadamente básico a ligeramente alcalino (8,4 - 8,7), el contenido de carbonato cálcico equivalente es de moderadamente alto a alto (20-40%) y el de materia orgánica de bajo a medio (1-5%).

El horizonte Bk (gravas) llega hasta 60-80 cm de profundidad. La matriz es de textura gruesa y el volumen ocupado por los elementos gruesos de más del 35%. Presenta acumulaciones secundarias (2-5%) de carbonato cálcico en forma de revestimientos de los elementos gruesos que dan lugar a un horizonte cámbico.

Por debajo aparece un contacto paralítico C, correspondiente a una lutita o a una arenisca.

Se clasifican como Haploxerept cálcico (SSS, 1999) y Cambisol léptico (calcárico, esquelético) (WRB, 2006).

FIGURA 23. Haploxerepts cálcicos (moderadamente profundos y esqueléticos). Perfil tipo y área de distribución.

4.1.3.8. Haploxerepts cálcicos (profundos)

Estos suelos son profundos (80-120 cm), bien drenados y de texturas medias, con pocos (1-5%) elementos gruesos. Se han desarrollado sobre sedimentos detríticos terrígenos en las laderas aterrazadas de pendiente moderada y en las laderas de pendiente suaves de la Depresión del Penedès, así como en las laderas de pendiente suave y en fondos de valle de la Sierra Prelitoral, donde ocupan unas 3.800 ha (4% de la superficie total).

El perfil presenta acumulaciones secundarias de carbonato cálcico en forma de pseudomicelios o pequeños nódulos que dan lugar a un horizonte cámbico. La secuencia típica de horizontes es,

Ap-Bwk(n)-C (lutita/arenisca).

El horizonte Ap tiene un espesor de unos 20-40 cm. El color (húmedo) es de castaño claro a marrón (7,5YR 7/3 – 10YR 5/4). La textura es media, y presenta pocos (1-5%) elementos gruesos. El pH es de moderadamente básico a ligeramente alcalino (8,2-8,7), el contenido de carbonato cálcico equivalente es de alto a muy alto (30-50%) y el de materia orgánica bajo (1-2%).

El horizonte Bwk(n) llega hasta 60-80 cm. El color (húmedo) es de castaño a marrón pálido (7,5YR 6/6 – 10YR 4/6). La textura es media, y presenta pocos (1-5%) elementos gruesos. Presenta acumulaciones secundarias (1-5%) de carbonato cálcico en forma de pseudomicelios, o nódulos pequeños, que dan lugar a un horizonte cámbico. El pH es ligeramente alcalino (8,3 - 8,9) y el contenido de carbonato cálcico equivalente muy alto (>40%).

Por debajo aparece un contacto paralítico C, lutita o arenisca.

Estos suelos se clasifican como Haploxerept cálcico (SSS, 1999) y Cambisol háplico (calcárico) (WRB, 2006).

FIGURA 24. Haploxerepts cálcicos (profundos). Perfil tipo y área de distribución.

4.1.3.9. Haploxerepts fluvénticos

Estos suelos son muy profundos (>120 cm), bien drenados y de texturas medias, con algunos (5-15%) elementos gruesos. Se han desarrollado sobre sedimentos detríticos terrígenos en las terrazas y fondos de la Depresión del Penedès y de la sierra Litoral, donde ocupan unas 3.800 ha (4% de la superficie total).

El perfil presenta pocas (1-5%) acumulaciones secundarias de carbonato cálcico en forma de pseudomicelios o pequeños nódulos que dan lugar a un horizonte cámbico. Además el perfil muestra una distribución irregular en profundidad del contenido de materia orgánica, muchas veces relacionado con la presencia de horizontes A enterrados. La secuencia típica de horizontes es,

Ap-Bw(k)-(Ab(k))

El horizonte Ap tiene un espesor de entre 20 y 30 cm. El color (húmedo) es de marrón oscuro a marrón fuerte (10YR 4/3 - 10YR 5/8). La textura es media y presenta algunos (5-15%) elementos gruesos. El pH es de moderadamente básico a ligeramente alcalino (8,1-8,6), el contenido de carbonato cálcico equivalente es de alto a muy alto (30-50%) y el de materia orgánica de bajo a medio (1-5%).

Los horizontes Bw(k) alcanzan profundidades superiores a los 120 cm. Su color (húmedo) es de marrón a marrón fuerte (10YR 3/4 - 10YR 5/8). La textura es media y presentan algunos (5-15%) elementos gruesos. El pH es de moderadamente básico a ligeramente alcalino (8,3-8,7) y el contenido de carbonato cálcico equivalente de alto a muy alto (30-50%). Pueden presentar acumulaciones secundarias (1-5%) de carbonato cálcico en forma de pseudomicelios, o pequeños nódulos, que dan lugar a un horizonte cámbico.

En algunos perfiles aparece un horizonte Ab(k), que suele corresponder con un antiguo epipedión actualmente enterrado. La textura es media y presenta pocos (1-5%) elementos gruesos. El pH es de moderadamente básico a ligeramente alcalino (8,2-8,8) y el contenido de carbonato cálcico equivalente de alto a muy alto (30-50%). Pueden presentar acumulaciones secundarias (1-5%) de carbonato cálcico en forma de pseudomicelios, o pequeños nódulos, que dan lugar a un horizonte cámbico.

Estos suelos se clasifican como Haploxerept fluvéntico (SSS, 1999) y Cambisol flúvico (calcárico) (WRB, 2006).

FIGURA 25. Haploxerepts fluvénticos. Perfil tipo y área de distribución.

4.1.3.10. Haploxerepts fluvénticos (esqueléticos)

Estos suelos son muy profundos (>120 cm), bien drenados y de texturas medias a moderadamente gruesas, con abundantes (35-70%) elementos gruesos. Se han desarrollado a partir de materiales detríticos terrígenos gruesos en las terrazas y fondos de la Depresión del Penedès, donde ocupan unas 1.000 ha (1% de la superficie total).

El perfil presenta pocas (1-5%) acumulaciones secundarias de carbonato cálcico en forma de pseudomicelios o pequeños nódulos que dan lugar a un horizonte cámbico. Además el perfil muestra una distribución irregular en profundidad del contenido de materia orgánica. La secuencia típica de horizontes es,

Ap-(Bw)-Bk (gravas).

El horizonte Ap tiene un espesor de entre 20 y 30 cm. El color (húmedo) es de marrón rosado a marrón fuerte (7,5 YR 7/3 - 10YR 5/6). La texturas es de media a moderadamente gruesa y presenta muchos (15-70%) elementos gruesos. El pH es de moderadamente básico a ligeramente alcalino (8,3-8,6), el contenido de carbonato cálcico equivalente es de alto a muy alto (30-50%) y el de materia orgánica de bajo a medio (1-5%).

El horizonte Bw, cuando aparece, tiene un espesor de 30 a 40 cm. El color (húmedo) es de marrón a castaño oscuro (7,5 YR 4/3 - 10YR 4/6). La texturas es de media a gruesa y presenta muchos (15-70%) elementos gruesos. El pH es de moderadamente básico a ligeramente alcalino (8,3-8,9) y el contenido de carbonato cálcico equivalente de alto a muy alto (30-50%).

A continuación, y hasta profundidades superiores a los 120 cm, encontramos un horizonte Bk. Se trata de un horizonte con abundantes elementos gruesos (>35 %), que presenta una matriz de textura gruesa y acumulaciones secundarias de carbonato cálcico en forma de revestimientos. El pH es de moderadamente básico a ligeramente alcalino (7,9-9,0) y el contenido de carbonato cálcico equivalente de alto a muy alto (30-50%).

Estos suelos se clasifican como Haploxerept fluvéntico (SSS, 1999) y Cambisol flúvico (calcárico, esquelético) (WRB, 2006).

FIGURA 26. Haploxerepts fluvénticos (esqueléticos). Perfil tipo y área de distribución.

4.1.3.11. Calcixerepts típicos

Estos suelos son muy profundos, bien drenados y de textura media, con algunos (5-15%) elementos gruesos. Se han desarrollado a partir de sedimentos detríticos finos en las laderas de pendientes moderadas y suaves y en las terrazas altas de la Depresión del Penedès, donde ocupan unas 14.000 ha (14% de la superficie total).

El perfil presenta muchas acumulaciones secundarias de carbonato cálcico que da lugar a un horizonte cálcico. La secuencia típica de horizontes es,

Ap-Bwkn.

El horizonte Ap tiene un espesor de 30 a 40 cm. El color (húmedo) es de castaño oscuro a amarillo parduzco (7,5YR 5/8 – 10YR 6/6). La textura es media y presenta algunos (5-15%) elementos gruesos. El pH es de moderadamente básico a ligeramente alcalino (8,2-8,6), el contenido de carbonato cálcico equivalente es de alto a muy alto (30-50%) y el de materia orgánica medio (2-5%).

El horizonte Bwkn alcanza más de 120 cm de profundidad. El color (húmedo) es de castaño fuerte a amarillo parduzco (7,5YR 5/8 – 10YR 6/6). La textura es media y presenta algunos (5-15%) elementos gruesos. El pH es de moderadamente básico a ligeramente alcalino (8,3-8,8) y el contenido de carbonato cálcico equivalente de alto a muy alto (30-50%). Presenta acumulaciones secundarias (>5%) de carbonato cálcico en forma de nódulos y/o rizoconcreciones que dan lugar a un horizonte cálcico.

Estos suelos se clasifican como Calcixerept típico (SSS, 1999) y como Calcisol háplico (WRB, 2006).

FIGURA 27. Calcixerepts típicos. Perfil tipo y área de distribución.

4.1.3.12. Calcixerepts típicos (Esqueléticos)

Estos suelos son muy profundos, bien drenados y de textura media a moderadamente fina, con abundantes (>35%) elementos gruesos. Se han desarrollado a partir de sedimentos detríticos con gravas en las laderas con pendientes suaves y moderadas de la Sierra Prelitoral, donde ocupan unas 100 ha (0,1% de la superficie total).

El perfil presenta acumulaciones secundarias de carbonato cálcico en forma de revestimientos y nódulos que da lugar a un horizonte cálcico. La secuencia típica de horizontes es,

Ap-Bwk(n)-Bk (gravas).

El horizonte Ap tiene un espesor de 20 a 40 cm. El color (húmedo) es marrón (7,5YR 4/4). La textura es de media a moderadamente fina y presenta muchos (35-70%) elementos gruesos. El pH es moderadamente básico (8,1–8,5), el contenido de carbonato cálcico equivalente es alto (30-40%) y el de materia orgánica de bajo a medio (1-5%).

Hasta los 40-80 cm encontramos un horizonte Bwk(n). El color (húmedo) es marrón (7,5YR 4/4). La textura es moderadamente fina y presenta muchos (35-70%) elementos gruesos. El pH es moderadamente básico (8,3–8,6) y el contenido de carbonato cálcico equivalente alto (30-40%). Presenta acumulaciones secundarias de carbonato cálcico en forma de nódulos y/o revestimientos de elementos gruesos que dan lugar a un horizonte cálcico.

A continuación, y hasta profundidades superiores a los 120 cm, encontramos un horizonte Bk. Se trata de un horizonte con abundantes elementos gruesos (>35 %), que presenta una matriz de textura media y acumulaciones secundarias de carbonato cálcico en forma de revestimientos, que dan lugar a un horizonte cálcico.

Estos suelos se clasifican como Calcixerept típico (SSS, 1999) y como Calcisol háplico (esquelético) (WRB, 2006).

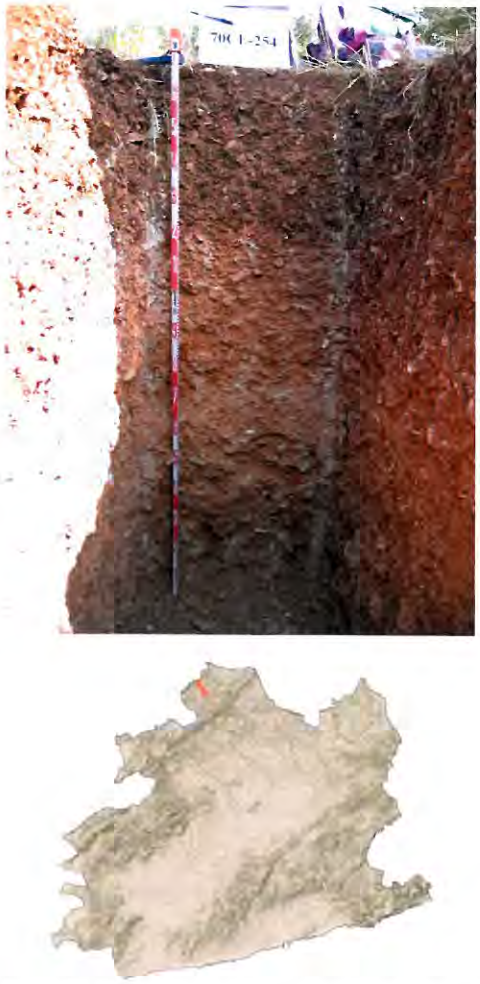


FIGURA 28. Calcixerepts típicos (esqueléticos). Perfil tipo y área de distribución.

4.1.3.13. Calcixerepts petrocálcicos (poco profundos)

Estos suelos son poco profundos, bien drenados y de textura media, con algunos (5-15%) elementos gruesos. Se han desarrollado sobre sedimentos detríticos finos en las plataformas residuales y en los abanicos aluviales de la depresión del Penedès, donde ocupan unas 4.500 ha (5% de la superficie total).

El perfil presenta, a menos de 40 cm de profundidad, un horizonte cementado por carbonato cálcico (horizonte petrocálcico). La secuencia típica de horizontes es,

Ap-Bkm.

El horizonte Ap tiene un espesor de 25 a 40 cm. El color (húmedo) es de castaño rojizo a castaño amarillento (5YR 4/4 – 10YR 5/4). La textura es media y presenta algunos (5-15%) elementos gruesos. El pH es de moderadamente básico a ligeramente alcalino (8,2-8,7), el contenido de carbonato cálcico equivalente es de alto a muy alto (30-50%) y el de materia orgánica medio (2-5%).

A continuación aparece el horizonte Bkm. Se trata de una capa muy fuertemente cementada por carbonato cálcico que constituye un endopedión petrocálcico.

Estos suelos se clasifican como Calcixerept petrocálcico (SSS, 1999) y como Calcisol epipétrico (WRB, 2006).

FIGURA 29. Calcixerept petrocálcicos (poco profundos). Perfil tipo y área de distribución.

4.1.3.14. Calcixerepts petrocálcicos (moderadamente profundos)

Estos suelos son moderadamente profundos, bien drenados y de textura media, con algunos (5-15%) elementos gruesos. Se han desarrollado sobre sedimentos detríticos finos en las plataformas residuales y en los abanicos aluviales de la Depresión del Penedès, donde ocupan unas 11.150 ha (12% de la superficie total).

El perfil presenta, entre 60 y 80 cm de profundidad, un horizonte cementado por carbonato cálcico (horizonte petrocálcico).La secuencia típica de horizontes es Ap-Bwkn-Bkm.

El horizonte Ap tiene un espesor de 20 a 40 cm. El color (húmedo) es de castaño rojizo a castaño amarillento (7,5YR 4/6 - 10YR 4/6). La textura es media y presenta algunos (5-15%) elementos gruesos. El pH es de moderadamente básico a ligeramente alcalino (8,1-8,6), el contenido de carbonato cálcico equivalente es de alto a muy alto (30-50%) y el de materia orgánica medio (2-5%).

El horizonte Bwkn alcanza una profundidad que normalmente no excede los 80 cm. El color (húmedo) es de castaño oscuro a amarillo parduzco (7,5YR 5/8 - 10YR 6/6). La textura es media, y presenta algunos (5-15%) elementos gruesos. El pH es de moderadamente básico a ligeramente alcalino (8,3-8,7) y el contenido de carbonato cálcico equivalente de alto a muy alto (30-50%).

Por debajo, aparece el horizonte Bkm; se trata de una capa muy fuertemente cementada por carbonato cálcico que constituye un endopedión petrocálcico.

Se clasifican como Calcixerept petrocálcico (SSS, 1999) y como Calcisol pétrico (WRB, 2006).

FIGURA 30. Calcixerepts petrocálcicos (moderadamente profundos). Perfil tipo y área de distribución.

4.1.3.15. Haploxeralfs lític-rúptic-incépticos

Estos suelos son poco profundos (<40 cm), bien drenados y de texturas finas, con un contenido variable (5-35%) de elementos gruesos. Se han desarrollado a partir de los materiales procedentes de la meteorización de las rocas calizas y/o dolomías en las plataformas y divisorias de las sierras Litorales, donde ocupan unas 100 ha. (0,1% de la superficie total).

Son suelos parcialmente decarbonatados y que muestran, en algunas zonas, translocaciones de la arcilla. Estos movimientos de la arcilla son, en ocasiones, muy difíciles de apreciar debido a los continuos procesos de edafoturbación. La secuencia típica de horizontes es,

A-(Bt)-R (caliza/dolomía).

El horizonte A tiene un espesor variable de 10 a 40 cm, debido al límite irregular con la roca subyacente. El color (húmedo) es de marrón oscuro a marrón (7,5YR 3/4 - 7,5YR 4/4). La textura es fina y presenta un contenido variable (5-35%) de elementos gruesos. El pH es moderadamente básico (8,1 – 8,3), el contenido de carbonato cálcico equivalente es bajo (5-10%) y el de materia orgánica es medio (2-5%).

El horizonte Bt se desarrolla cerca del límite con la roca subyacente, y es más fácilmente observable en las fracturas de la roca caliza. Su color (húmedo) va de rojo oscuro a marrón rojizo (2,5YR 4/4 - 5YR 4/4). La textura es fina y presenta algunos (5-15%) elementos gruesos. El pH es moderadamente básico (8,3 – 8,4) y el contenido de carbonato cálcico equivalente es bajo (5-10%). Presenta evidencias de iluviación de arcilla, básicamente revestimientos de poros y canales de raíces, lo que da lugar a un horizonte argílico.

Por debajo aparece la roca caliza R, frecuentemente fragmentada hasta profundidades superiores a 120 cm.

Se clasifican como Haploxeralf lítico-rúptico-incéptico (SSS, 1999) y Luvisol léptico (rúptico, crómico) (WRB, 2006).

FIGURA 31. Haploxeralfs lític-rúptic-incépticos. Perfil tipo y área de distribución.

4.1.3.16. Haploxeralfs cálcicos

Estos suelos son muy profundos (>120 cm), moderadamente bien drenados y de texturas medias a finas, con algunos (5-15%) elementos gruesos. Se han desarrollado sobre sedimentos detríticos finos en las plataformas y divisorias residuales de la Depresión del Penedès, donde ocupan una superficie de unas 450 ha (0,5% de la superficie total).

Aparecen en posiciones muy estables, donde sufrieron decarbonatación, translocación de arcillas y formación de un horizonte argílico. Posteriormente sufrieron la recarbonatación del perfil que dio lugar a la acumulación secundaria de carbonatos en forma de pseudomicelios y/o nódulos, dando lugar a horizontes cálcicos. La secuencia típica de horizontes es,

Ap-Bwk(n)-Btkn.

El horizonte Ap tiene un espesor de unos 20 a 30 cm. El color (húmedo) es de marrón rojizo a rojo amarillento (5YR 4/4 - 5YR 4/6). La textura es de media a moderadamente fina, y presenta algunos (5-15%) elementos gruesos. El pH es de moderadamente básico a ligeramente alcalino (8,1 – 8,6), el contenido de carbonato cálcico equivalente es de moderadamente alto a alto (20-40%) y el de materia orgánica de bajo a medio (1-5%).

El horizonte Bwk(n) tiene un espesor de unos 30 a 40 cm. El color (húmedo) es de marrón rojizo a rojo amarillento (5YR 4/4 - 5YR 4/6). La textura es de media a moderadamente fina y presenta algunos (5-15%) elementos gruesos. El pH es de moderadamente básico a ligeramente alcalino (8,4 – 8,7) y el contenido de carbonato cálcico equivalente es de moderadamente alto a alto (20-40%). Presenta acumulaciones secundarias de carbonato cálcico en forma de pseudomicelios y/o nódulos que dan lugar a un horizonte cálcico.

El horizonte Btkn se alcanza profundidades superiores a los 120 cm. Su color (húmedo) es de rojo oscuro a marrón rojizo (2,5YR 4/4 - 5YR 4/4). La textura es de moderadamente fina a fina, y presenta algunos (5-15%) elementos gruesos. El pH es moderadamente básico (8,2 – 8,5) y el contenido de carbonato cálcico equivalente de medio a moderadamente alto (10-30%). Presentan evidencias de translocación de arcilla en poros y canales de raíces, que dan lugar a un horizonte argílico, y acumulaciones secundarias de carbonato cálcico en forma de pseudomicelios y/o nódulos, que dan lugar a un horizonte cálcico.

Se clasifican como Haploxeralf cálcico (SSS, 1999) y Calcisol luvico (crómico) (WRB, 2006).

FIGURA 32. Haploxeralfs cálcicos. Perfil tipo y área de distribución.

4.1.3.17. Palexeralfs petrocálcicos

Estos suelos son moderadamente profundos (40-80 cm), moderadamente bien drenados y de texturas medias a moderadamente finas, con algunos (5-15%) elementos gruesos. Se han desarrollado a partir de sedimentos detríticos finos en plataformas residuales y terrazas altas de la Depresión del Penedès, donde ocupan unas 300 ha (0,3% de la superficie total).

Aparecen en posiciones muy estables, donde sufrieron decarbonatación, translocación de arcillas y formación de un horizonte argílico. Posteriormente sufrieron la recarbonatación del perfil que dio lugar a la acumulación secundaria de carbonatos en forma de pseudomicelios y/o nódulos, dando lugar a horizontes cálcicos y petrocálcicos. La secuencia típica de horizontes es,

Ap-Btk(n)-Bkm.

El horizonte Ap tiene típicamente un espesor de unos 20 a 30 cm. El color (húmedo) es de castaño amarillento oscuro a castaño pálido (10YR 4/3 - 10YR 6/4). La textura es media, y presenta algunos (5-15%) elementos gruesos. El pH es de moderadamente básico a ligeramente alcalino (8,1-8,6), el contenido de carbonato cálcico equivalente es de alto a muy alto (30-50%) y el de materia orgánica de bajo a medio (1-5%).

El horizonte Btk(n) se extiende hasta los 60 o 80 cm de profundidad. Su color (húmedo) es rojo amarillento (5YR 5/6). La textura es de moderadamente fina a fina y presenta algunos (5-15%) elementos gruesos. El pH es de moderadamente básico a ligeramente alcalino (8,4-8,7) y el contenido de carbonato cálcico equivalente es de alto a muy alto (30-50%). Presentan evidencias de translocación de arcilla en poros y canales de raíces, que dan lugar a un horizonte argílico, y acumulaciones secundarias de carbonato cálcico en forma de pseudomicelios y/o nódulos, que dan lugar a un horizonte cálcico.

Por debajo, aparece el horizonte Bkm; se trata de una capa muy fuertemente cementada por carbonato cálcico que constituye un endopedión petrocálcico.

Se clasifican como Haploxeralf petrocálcico (SSS, 1999) y Calcisol pétrico lúvico (crómico) (WRB, 2006).

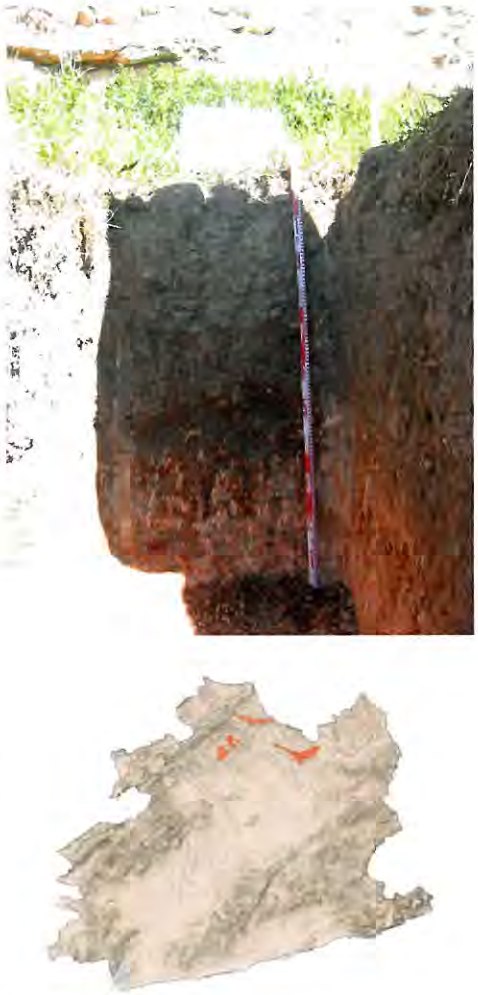


FIGURA 33. Palexeralfs petrocálcicos. Perfil tipo y área de distribución.

4.1.4. Referencias bibliográficas

ALBRICH, S., J.M. BERNAUS, C. BOIX, E. CAUS, C. MARTÍN-CLOSAS, R. SALAS, V. VICEDO, R. VILLALONGA (2006). Caracterización bioestratigráfica y paleoambiental del Cretácico inferior (Berriasiense-Barremiense) del Macizo de Garraf (Cadena Costera Catalana). Rev. Española de Micropaleontología, 38.

ANADÓN, P., L. CABRERA, J. GUIMERÀ, P. SANTANACH (1985). Paleogene strike-slip deformation and sedimentation along the southeastern margin of the Ebro Basin. Soc. Econ. Paleontologist and Mineralogist, 37.

CABRERA, L., F. CALVET, J. GUIMERÀ, A. PERMANYER. (1991). El registro sedimentario miocénico en los semigrabens del Vallès-Penedès y del Camp: organización secuencial y relaciones tectónica-sedimentación. I Congreso del Grupo Español del Terciario. Libro-Guia excursión nº 4.

CASANOVAS-VILLAR, I., D.M. ALBA, S MOYÀ, J. GALINDO, L. CABRERA, M. GARCÉS, M. FURIÓ, J.M. ROBLES, M. KÖHLER, C. ANGELONE (2006). Biochronological, taphonomical, and paleoenvironmental background of the fossil great ape Pierolapithecus catalanicus (Primates, Hominidae). Journal of Human Evolution, 55.

CBSA. 1983. Sistema de información Edafológica y Agronómica de España. SINEDARES. Manual para la descripción codificada de suelos en el campo. MAPA. Madrid. 137 pp.

DAAM. (2008). "Mapa de sòls (1:25.000) de l'àmbit geogràfic de la DO Penedès". Vilafranca del Penedès.

ENCICLOPÈDIA CATALANA (1986). Història Natural dels Països Catalans, Vol. 2: Geologia II.

ENCICLOPÈDIA CATALANA. (1986). Història Natural dels Països Catalans. Vol. 7: Vegetació.

ENCICLOPÈDIA CATALANA (1992). Gran Geografia Comarcal de Cataluña: Alt Penedès, Baix Penedès, Garraf i Anoia.

ESPAIS D'INTERÉS GEOLÒGIC. Fichas descriptivas. (2004). EIG 332, Successiò miocena dels Hostalets de Pierola; EIG 340, Esculls miocens de Sant Pau d'Ordal - Can Sala; EIG 341, Guixeres de Vilobí del Penedès; EIG 342, Turons de Pacs del Penedès; EIG 345, Falles normals de l'Arboçar del Penedès; EIG 346, Sant Miquel d'Olèrdola; EIG 348, Massís del Garraf; EIG 349, Miocè de Castellet i la Gornal. Disponibles en: http://www20.gencat.cat/portal/site/dmah/menuitem.64be942b6641a1214e9cac3bb0c0e1a0/?vgnextoid=118c1a22693d7210VgnVCM1000008d0c1e0aRCRD&vgnextchannel=118c1a22693d7210VgnVCM1000008d0c1e0aRCRD&vgnextfmt=default. (22/3/2011).

GALLART, F. (1981). Neógeno superior y Cuaternario del Penedès (Cataluña, España) (1981). Acta Geológica Hispánica, 16-3.

GARCIA, A. (Editor) (1982). El Cretácico de España. Disponible en: http://www.ucm.es/centros/cont/descargas/documento23469.pdf. (22/3/2011).

Grup de Treball "Nomenclatura d'horitzons de sòls". (1993). Denominació d'horitzons genètics (i capes). Secció de sòls de la ICEA i Delegació Territorial de la SECS. Quaderns agraris, 16 desembre 1993. Pág. 111-126

INSTITUT GEOLÒGIC DE CATALUNYA - INSTITUT CARTOGRÀFIC DE CATALUNYA (2010). Atlas geològics de Catalunya.

MAPA GEOLÓGICO DE ESPAÑA 1:50.000. Memorias descriptivas. Hojas 419, Vilafranca del Penedès (1972); 420, Hospitalet del Llobregat (1973); 447, Villanueva y Geltru (1972).

MAPA GEOLÓGICO DE ESPAÑA 1:200.000. Hoja 42, Tarragona. (1986)

MARTÍN CLOSAS, C. (1984). L'orígen de la depressió del Penedès i la seva evolució geológica. Miscel·lània Penedesenca.

SALAS, R., C. MARTÍN-CLOSAS. (1991). El Cretácico inferior del Nordeste de Iberia. Guía de Campo de las excursiones, III Coloquio del Cretácico de España.

SOIL SURVEY DIVISION STAFF (1993). Soil Survey Manual. USDA, 473 pp. Washington.

SOIL SURVEY STAFF (1999). Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. NRCS-USDA. Washington, D.C., 869 pp.

VERA, J.A. (Editor) (2004). Geología de España.

4.2. Mapa y evaluación de los suelos del ámbito geográfico de la Denominación de Origen Penedès

Jaume Boixadera[1], Carmen Herrero[1], Marc Vicens[2]

(1) Servei de Producció Agrícola, DAAM, Generalitat de Catalunya. Campus ETSEA. 25198 Lleida.
(2) Institut Geològic de Catalunya. Generalitat de Catalunya. C/ Balmes, 209-211. 08006 Barcelona.

Resumen

Se presenta la cartografía a escala (1:25.000) de los suelos del ámbito geográfico de la Denominación de Origen Penedès (DO Penedès), un resumen de las principales características de los suelos cartografiados y la descripción de algunos suelos representativos de la DO, a modo de ejemplo. En la segunda parte se explica la metodología para la evaluación de estos suelos con fines vitícolas, desarrollada a partir de la información del mapa de suelos, y se discuten los principales resultados obtenidos. También se incluye un método para la obtención de un mapa de potencial de vigor del suelo.

4.2.1. Introducción

La creciente competencia entre mercados vitivinícolas en el ámbito mundial, con un aumento de la demanda de vinos de calidad y en especial de vinos con tipicidad, ha conducido a los técnicos y entidades de las distintas áreas vitícolas a promover actuaciones para la zonificación. Dichas actuaciones tienen como principal objetivo la identificación de binomios material vegetal–parcela que optimicen el potencial productivo y cualitativo en las zonas productivas, posibilitando, además, la determinación del destino enológico del mosto obtenido en ellas, y la identificación de las prácticas de cultivo más adecuadas a cada realidad manteniendo una adecuada calidad del medio, especialmente del suelo. La delimitación de áreas de gran aptitud para un uso agrícola debería tener, además, importancia en la elaboración de planes generales de ordenación del territorio.

Los suelos son un componente fundamental de las unidades de gestión y/o evaluación del territorio, como son los *terroirs*, en el caso de la viña. Su conocimiento, a una escala y forma adecuada, constituye uno de los desafíos para los edafólogos, especialmente para los cartógrafos de suelos. El caso del ámbito geográfico de la DO Penedès, que coexiste en su territorio con las Denominaciones de Origen Cava y Catalunya, es un ejemplo de ello. Con una superficie total de 156.000 ha, de las cuales 42.000 son agrícolas y de ellas 'solo' 26.000 están plantadas de viña. Esta significativa extensión constituye un problema cuando se desea cartografiar a una escala suficientemente detallada y producir una evaluación con fines vitícolas.

4.2.2. El mapa de suelos 1:25.000 del ámbito geográfico de la DO Penedès

El mapa de suelos (1:25.000) del ámbito geográfico de la DO. Penedès se enmarca en el proyecto cooperativo del Mapa de Suelos 1:25.000 de Cataluña, que desde el año 1984 está llevando a cabo la *Secció d'Avaluació de Recursos Agraris* del *Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural* (DAAM) de la Generalitat de Cataluña. En este caso se ha ejecutado en colaboración con los Consejos Reguladores de la DO Cava y de la DO Penedès, el *Consell Comarcal de l'Alt Penedès* y especialistas del mundo vitivinícola de la zona, del Instituto Catalán de la Viña y el Vino (INCAVI) y del DAAM.

El mapa culmina el esfuerzo realizado por diversos grupos durante más de 15 años de trabajos en el área. En este sentido cabe destacar los inicios, con la cartografía de suelos 1:50.000 llevada a cabo por Martinez-Casasnovas en 1998 y el Mapa de suelos (1:25.000) de

los términos municipales de la Granada, les Cabanyes, Pacs, Santa Fe y Vilafranca del Penedès (Alt Penedès) (Nogués *et al.*, 1999), que constituyó el trabajo piloto de la zona.

El mapa final presenta más de 1600 unidades cartográficas, organizadas en una leyenda de tipo fisiográfico, y añade 78 nuevas unidades taxonómicas de suelos al Catálogo de Series del DAAM, definidas a nivel de serie (SSS, 1999) (tabla 1). Para su ejecución se han descrito más de 1.450 perfiles (figura 1) y se han analizado más de 3.600 muestras.

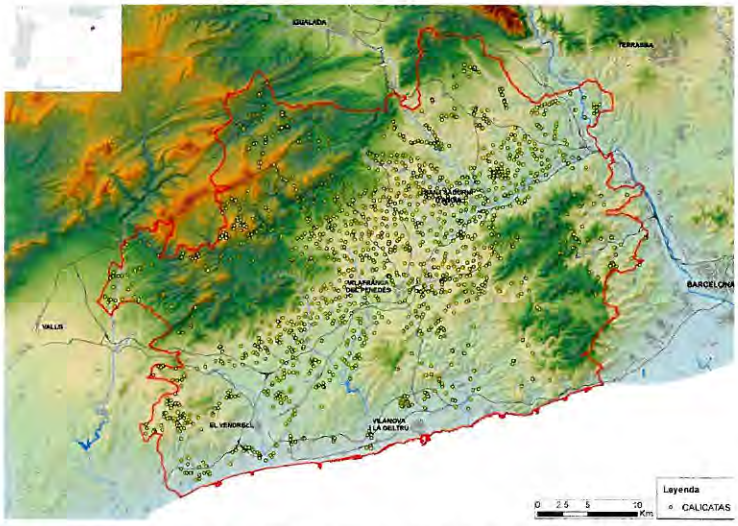


FIGURA 1. Localización de los perfiles descritos para la ejecución del Mapa de suelos (1:25.000) del ámbito geográfico de la D.O. Penedès.

Como metodología de referencia se ha utilizado la propuesta en el "Soil Survey Manual" (SSS, 1993). La nomenclatura utilizada se basa en la recogida por CBDSA, 1983 y por el *Grup de treball 'nomenclatura d'horitzons de sòls'*, 1993. Para el resto de aspectos metodológicos se han empleado los habituales del Mapa de Suelos 1:25.000 de Cataluña, que se pueden consultar en la página web del DAAM (http://www.gencat.cat/daam/mapasols/)

4.2.3. Características principales de los suelos de la D.O. Penedès

La tabla 1 recoge la clasificación, a nivel de subgrupo, de los tipos de suelos más interesantes en la DO Penedès, tanto por la superficie que ocupan, como por su singularidad.

TABLA 1. Series de suelos cartografiados en la DO Penedès

Subgrupo (Soil Taxonomy, SSS 1999)	Denominación de la serie	Familia (Soil Taxonomy, SSS 1999)
Xerorthent lítico	Bonastre	Xerorthent lítico, franca, carbonática, térmica, superficial
	Cales	Xerorthent lítico, franca, mezclada, térmica, superficial
	Aguilera	Xerorthent lítico, franca, mezclada, térmica, superficial
	Cancanals	Xerorthent lítico, franca, mezclada, térmica, superficial
	Ponderosa	Xerorthent lítico, franca, mezclada, térmica, superficial
Xerorthent típico	Avellana	Xerorthent típico, esquelética franca, mezclada, térmica
	Begues	Xerorthent típico, franca fina, mezclada, térmica
	Cangras	Xerorthent típico, franca, mezclada, térmica, superficial
	Canvalls	Xerorthent típico, franca, mezclada, térmica, superficial
	Masjover	Xerorthent típico, franca fina, mezclada, térmica
	Arbocet	Xerorthent típico, franca, carbonática, térmica
	Banyeres	Xerorthent típico, franca, carbonática, térmica, superficial
	Somera	Xerorthent típico, franca, mezclada, térmica, superficial
	Fassina	Xerorthent típico, franca, mezclada, térmica, superficial
	Cairot	Xerorthent típico, franca, mezclada, térmica, superficial
	Avellana	Xerorthent típico, esqueletica franca, mezclada, térmica
	Mas	Xerorthent típico, franca, carbonática, térmica, superficial
	Colza	Xerorthent típico, franca fina, mezclada, térmica
	Maspalau	Xerorthent típico, franca fina, mezclada, térmica

Subgrupo (Soil Taxonomy, SSS 1999)	Denominación de la serie	Familia (Soil Taxonomy, SSS 1999)
Xerorthent típico	Pujador	Xerorthent típico, franca gruesa, carbonática, térmica
	Espobles	Xerorthent típico, franca, carbonática, térmica, superficial
Calcixerept típico	Vilafranca	Calcixerept típico, franca fina, carbonática, térmica
	Marges	Calcixerept típico, franca gruesa, carbonática, térmica
	Bonaterra	Calcixerept típico, franca fina, mezclada, térmica
	Carreres	Calcixerept típico, franca gruesa, mezclada, térmica
	Grijanç	Calcixerept típico, esqueletica franca, carbonática, térmica
	Marquet	Calcixerept típico, esqueletica franca, mezclada, térmica
	Saliner	Calcixerept típico, franca fina, mezclada, térmica
	Domenys	Calcixerept típico, franca fina, carbonática, térmica
	Olèrdola	Calcixerept típico, franca fina, carbonática, térmica
	Claret	Calcixerept típico, esqueletica franca, mezclada, térmica
	Miralles	Calcixerept típico, limosa fina, mezclada, térmica
	Selma	Calcixerept típico, franca fina, carbonática, térmica
	Llacuna	Calcixerept típico, esqueletica franca, mezclada, térmica
	Roges	Calcixerept típico, franca fina, carbonática, térmica
Calcixerept petrocálcico	Calafell	Calcixerept petrocálcico, franca, carbonática, térmica
	Pujols	Calcixerept petrocálcico, franca, carbonática, térmica, superficial
	Llorenç	Calcixerept petrocálcico, franca fina, mezclada, térmica
	Vendrell	Calcixerept petrocálcico, franca fina, carbonática, térmica
	Arboç	Calcixerept petrocálcico, franca fina, mezclada, térmica
Haploxerept cálcico	Badorc	Haploxerept cálcico, esqueletica franca, mezclada, térmica
	Cabanyes	Haploxerept cálcico, franca fina, carbonática, térmica
	Ventosa	Haploxerept cálcico, franca fina, mezclada, térmica
	Vilobí	Haploxerept cálcico, franca fina, mezclada, térmica
	Cogullada	Haploxerept cálcico, franca fina, mezclada, térmica
	Pontons	Haploxerept cálcico, franca gruesa, mezclada, térmica
	Gornal	Haploxerept cálcico, franca fina, mezclada, térmica
	Avinyonet	Haploxerept cálcico, franca gruesa, mezclada, térmica
	Rovira	Haploxerept cálcico, franca fina, mezclada, térmica
	Puigmoltó	Haploxerept cálcico, franca gruesa, mezclada, térmica
Haploxerept fluvéntico	Aranyons	Haploxerept fluvéntico, franca fina, mezclada, térmica
	Guirreta	Haploxerept fluvéntico, franca gruesa, mezclada, térmica
	Dalt	Haploxerept fluvéntico, limosa fina, mezclada, térmica
	Llera	Haploxerept fluvéntico, franca gruesa, mezclada, térmica
	Hostalets	Haploxerept fluvéntico, franca gruesa, mezclada, térmica
	Rofes	Haploxerept fluvéntico, franca fina, mezclada, térmica
	Albinyana	Haploxerept fluvéntico, esqueletica franca, mezclada, térmica
	Pierola	Haploxerept fluvéntico, esqueletica franca, mezclada, térmica
	Jonc	Haploxerept fluvéntico, esqueletica franca, mezclada, térmica
Xerofluvent típico	Canyadell	Xerofluvent típico, franca gruesa, mezclada, térmica
	Canyissar	Xerofluvent típico, franca fina, carbonática, térmica
	Feixet	Xerofluvent típico, limosa fina, mezclada, térmica
	Sadurní	Xerofluvent típico, franca fina, mezclada, térmica
	Portella	Xerofluvent típico, franca fina, mezclada, térmica
	Marmellar	Xerofluvent típico, esqueletica franca, mezclada, térmica
	Alber	Xerofluvent típico, esqueletica franca, mezclada, térmica
	Margantí	Xerofluvent típico, esqueletica franca, mezclada, térmica

Subgrupo (Soil Taxonomy, SSS 1999)	Denominación de la serie	Familia (Soil Taxonomy, SSS 1999)
Haploxeralf lítico-rúptico-incéptico	Campdasens	Haploxeralf lítico-ruptico-inceptico, argilosa, mezclada, térmica, superficial
Haploxeralf cálcico	Cugat	Haploxeralf cálcico, franca fina, mezclada, térmica
	Hortons	Haploxeralf cálcico, franca fina, mezclada, térmica
	Riudebitlles	Haploxeralf cálcico, esqueletica argilosa, carbonática, térmica
	Falguerar	Haploxeralf cálcico, franca fina, mezclada, térmica
Haploxeroll lítico	Sapera	Haploxeroll lítico, franca, mezclada, térmica, superficial
Xerofluvent oxiácuico	Arboçar	Xerofluvent oxiácuico, franca fina, mezclada, térmica
Palexeralf cálcico	Sesgarrigues	Palexeralf petrocálcico, franca fina, mezclada, térmica
Haploxerert típico	Romà	Haploxeralf incéptico, fina, mezclada, térmica
Calcixerept típico (oxiácuico)	Molanta	Calcixerept típico (oxiácuico), limosa fina, mezclada, térmica

La única propiedad común a prácticamente todos los suelos del Penedès es su naturaleza calcárea. Sólo aparecen algunas excepciones en áreas muy limitadas de suelos desarrollados sobre pizarras, sobre travertinos, sobre arcillas del Keuper o sobre alguna plataforma decarbonatada. A lo largo de la realización del Mapa de Suelos (1:25.000) de Cataluña y otros trabajos de la *Secció d'Avaluació de Recursos Agraris* se ha encontrado una excelente correlación entre el carbonato cálcico equivalente y la caliza activa para esta zona.

La mayoría de los suelos presentan bajos contenidos de materia orgánica, con frecuencia entorno al 1 %, fruto, sin duda, de un cultivo secular en estos suelos. Son muy numerosos los suelos profundos con elevada capacidad de retención de agua, especialmente en los fondos y partes bajas de las laderas. En las áreas forestales o no cultivadas, con abundantes afloramientos rocosos, predominan los suelos superficiales. El limo es la fracción granulométrica predominante, lo que da lugar a suelos de textura franco-limosa, franca o franco-arcillolimosa. La pedregosidad y los elementos gruesos, en general, son poco abundantes.

Los suelos actualmente cultivados en la DO Penedès se han desarrollado prácticamente en su totalidad sobre materiales calcáreos blandos, que rellenan la Depresión del Penedès. Las superficies geomorfológicas son predominantemente modernas formadas por laderas y fondos de valle. La red fluvial se ha encajado fuertemente, especialmente en el sector N al pie del macizo de Montserrat, lo que ha provocado una erosión muy activa en los parajes de Masquefa-Piera (Boixadera, 1983). Existe una notable superficie ocupada por barrancos y áreas similares a *badlands* debido a los intensos fenómenos erosivos existentes.

El cultivo de la viña, desarrollado en la región durante decenios, ha jugado también un papel clave en los procesos de formación de suelos y ello en una doble vertiente: los procesos de erosión-deposición y la pérdida de materia orgánica. También, la práctica tradicional del desfonde, ocasionado al arrancar las viñas, ha provocado que los horizontes Ap adquieran un espesor de hasta 60-80 cm con presencia de horizontes A enterrados y de endopediones cálcicos en superficie (Nogués *et al.*, 1999).

Los procesos de sedimentación al pie de las laderas erosionadas han conducido a la formación de suelos de gran profundidad que presentan, con frecuencia, un carácter fluvéntico. En las superficies situadas a mayor cota, muy abundantes y extensas, sobre calizas domina el uso forestal, encontrándose horizontes oscuros y ricos en materia orgánica que, en algunas ocasiones, cualifican para mólicos, pero que frecuentemente no es así por los fenómenos de erosión soportados.

Las superficies geomorfológicas más estables presentan horizontes argílicos, rubefactados y con distinto grado de recarbonatación (Btkn). Menos frecuente es la presencia de plataformas residuales con horizontes petrocálcicos. Merece citarse la existencia de superficies relativamente recientes con horizontes argílicos (Nogués *et al.*, 1999), así como de argílicos al pie de las laderas que han sido descritos también por Bech (1999) y Carrillo *et al.* (2007). Las relaciones suelos-geomorfología han sido estudiados entre otros por Josa (1985), cuyas conclusiones sirvieron para orientar la cartografía.

Uno de los principales procesos formadores es la redistribución –que no lavado- de carbonatos, ampliamente representado en toda la región, con variedad de morfologías (nódulos, rizoconcrecciones, etc) y que con frecuencia llegan a confundirse con los paleosuelos diagenizados que rellenan la fosa. Otro proceso formador notable es la presencia de suelos con incorporación de materia orgánica a gran profundidad similar al carácter páchico de los Xerolls.

Unos pocos suelos presentan rasgos de hidromorfismo. Una parte de ellos se distribuyen alrededor de Vilafranca sobre sedimentos cuaternarios y otros están dispersos por el territorio, en lugares puntuales, allí donde el substrato de calcilutita es favorable por ser muy arcilloso.

Hay que señalar, finalmente, la presencia de importantes superficies donde los fuertes movimientos de tierra, para crear nuevas plantaciones mecanizadas, han alterado drásticamente la secuencia de horizontes genéticos. Debido a que en muchos lugares donde se han realizado estas operaciones, no existía un horizonte B, que una vez removido conservara sus características diferenciadoras (Bk, Bt, Bkm, etc), el resultado ha sido la formación de Xerorthents y, tan sólo puntualmente, de Xerarents.

En la DO Penedès un porcentaje significativo de suelos tiene buen potencial productivo y son capaces de producir vinos de moderado grado alcohólico y buena acidez. El siguiente grupo de suelos en importancia seria el de aquellos con un potencial productivo ligeramente inferior, pero todavía elevado.

4.2.4. Descripción de algunos tipos de suelos de la D.O. Penedès

4.2.4.1. Serie Can Vall (Perfil 70CE-033)

Información general

DESCRIPTOR: Marc Vicens

FECHA: 11/04/2006

SITUACIÓN:

Paraje: La viña del Biendó

Término municipal: Masquefa

COORDENADAS UTM:

X: 399500

Y: 4594397

COTA (m): 250

HOJA: 280-121

Geomorfología

Superficie de erosión ondulada, fuertemente disectada, 5-10 % de pendiente

Material original

Areniscas y lutitas miocenas

Uso del suelo y vegetación

Viñedo en secano, en mosaico con cereal de invierno y almendros

Pinar de pino carrasco (*Pinus halepensis*)

Profundidad efectiva: 50 cm

Pedregosidad superficial

Poco pedregoso, grava (2-6 cm)

Sin afloramientos rocosos

Drenaje

Bien drenado

CRAD(USDA, 1983)

Baja (64-127 mm/1,5m)

Clima del suelo (STS)

Régimen de humedad: xérico

Régimen de temperatura: térmico

Clasificación tentativa

Regosol háplico (eútrico, calcáreo). WRB (IUSS, 2006)

Xerorthent típico. STS (SSS, 1999)

Descripción macromorfológica de los horizontes (nomenclatura SINEDARES)

ESTADO DE HUMEDAD: Ligeramente húmedo. ESTADO DE OXIDACIÓN-REDUCCIÓN: Oxidado. COLOR (de la matriz del suelo): marrón amarillento oscuro (10YR 4/4) en húmedo. MANCHAS: Inexistentes. ELEMENTOS GRUESOS: algunos (5-15% en volumen), caliza, de tamaño de grava grande (2-6 cm), de forma redondeada esferoidal, sin orientación definida, distribución regular. TEXTURA AL TACTO: Franco-arcillosa. ESTRUCTURA: Moderada, en bloques subangulares, mediana. COMPACIDAD: Poco compacto, friable. ACTIVIDAD DE LA FAUNA: No aparente. ACTIVIDAD ANTRÓPICA: No aparente. RAÍCES: finas y muy finas, de aspecto global normal. TEST DE CAMPO: Alta reacción de la matriz al HCl 11%. LÍMITE INFERIOR: neto, plano. HORIZONTE DIAGNÓSTICO: ÓCRICO.

ESTADO DE HUMEDAD: Ligeramente húmedo. ESTADO DE OXIDACIÓN-REDUCCIÓN: Oxidado. COLOR (de la matriz del suelo): marrón amarillento claro (10YR 6/4) en húmedo. MANCHAS: Inexistentes. ELEMENTOS GRUESOS: muy pocos (1-5% en volumen), caliza, de tamaño de grava grande (2-6 cm), de forma redondeada esferoidal, sin orientación definida, distribución regular. TEXTURA AL TACTO: Franco-limosa. ESTRUCTURA: Débil, en bloques angulares, mediana. COMPACIDAD: Compacto, friable. ACTIVIDAD DE LA FAUNA: No aparente. ACTIVIDAD ANTRÓPICA: No aparente. RAÍCES: muy finas, de aspecto global limitado por contacto paralítico. TEST DE CAMPO: Alta reacción de la matriz al HCl 11%. LÍMITE INFERIOR: Neto, plano.

Datos analíticos

Propiedades químicas

Horizontes (profundidades)	pH H_2O 1:2,5	CE 1:5 (dS/m a 25 °C)	Materia Orgánica (%)	Carbonato cálcico eq %	Caliza Activa (%)
Ap (0-30 cm)	8,6 (8,5-9,0)	0,32 (0,2-0,3)	1,7 (0,4-2,1)	31 (19-32)	4,4 (3,9-5,7)
BC (30-50 cm)	8,8 (8,7-9,2)	0,25 (0,2-0,3)	- -	27 (22-30)	4,6 (3,7-4,6)

Humedad y complejo de cambio ($AcONH_4$)

Horizontes (profundidades)	Capacidad de campo (Θ_{-33}) (g H_2O/100g suelo)	Punto de marchitez (Θ_{-1500}) (g H_2O/100g suelo)	CRAD (mm/10 cm)	CIC ($cmol(+)kg^{-1}$)
Ap (0-30 cm)	30,5 (19,0-29,8)	17,4 (7,0-14,3)	16,2 (15,0-20,1)	- (10,0-17,1)
BC (30-50 cm)	26,1 (23,3-34,2)	11,7 (11,6-18,2)	17,8 (17,0-23,3)	- (15,4-22,3)

Granulometría

Horizontes (profundidades)	Arena total (%)	Limo total (%)	Arcilla total (%)	Clase textural (USDA)
Ap (0-30 cm)	38 (10-40)	30 (37-60)	31 (18-39)	Franco-arcillosa
BC (30-50 cm)	38 (16-43)	44 (36-54)	18 (19-33)	Franca

(entre paréntesis se indican los percentiles 10 y 90 de la serie de suelos Can Vall).

4.2.4.2 Serie Vilafranca (Perfil 70CE-131)

Información general

DESCRIPTOR: Emilio Ascaso
FECHA: 17/05/2006.
SITUACIÓN:
Paraje: Terracuques
Término municipal: l'Arboç
COORDENADAS UTM:
X: 382525
Y: 4571098
COTA (m): 156
HOJA: 275-131

Geomorfología

Abanico aluvial, depresión del Penedès
2-5 % de pendiente

Material original

Detríticos terrígenos finos

Uso del suelo y vegetación

Viñedo en secano, en mosaico con almendros
Pinar de pino carrasco (*Pinus halepensis*)

Profundidad efectiva

>120 cm

Pedregosidad superficial

Poco pedregoso, grava (2-6 cm).
Sin afloramientos rocosos

Drenaje

Bien drenado

CRAD (USDA, 1983)

Alta (190-250 mm/1,5m)

Clima del suelo (STS)

Régimen de humedad: xérico
Régimen de temperatura: térmico

Clasificación tentativa

Calcisol háplico (eútrico, calcáreo). WRB (IUSS, 2006)
Calcixerept típico. Soil Taxonomy (SSS, 1999)

Descripción macromorfológica de los horizontes (nomenclatura SINEDARES)

0-34 cm Ap

ESTADO DE HUMEDAD: Ligeramente húmedo. ESTADO OXIDACIÓN-REDUCCIÓN: Oxidado. COLOR (de la matriz del suelo): rojo amarillento (7,5YR 4/6) en húmedo. MANCHAS: Inexistentes. ELEMENTOS GRUESOS: algunos (5-15% en volumen), caliza, de tamaño de grava media (0,6-2 cm), de forma redondeada tabular, sin orientación definida, distribución regular. TEXTURA AL TACTO: Franca. ESTRUCTURA: Moderada, en bloques subangulares, mediana. COMPACIDAD: Compacto, friable. ACTIVIDAD DE LA FAUNA: Aparente, galerías y turrículas. ACTIVIDAD ANTRÓPICA: No aparente. RAÍCES: finas y muy finas, de aspecto global normal. TEST DE CAMPO: Muy alta reacción de la matriz al HCl 11%. Límite inferior: Neto, plano. HORIZONTE DIAGNÓSTICO: ÓCRICO.

34-50 cm Bkn

ESTADO DE HUMEDAD: Ligeramente húmedo. ESTADO OXIDACIÓN-REDUCCIÓN: Oxidado. COLOR (de la matriz del suelo): rojo amarillento (7,5YR 5/6) en húmedo. MANCHAS: Inexistentes. ELEMENTOS GRUESOS: algunos (5-15% en volumen), caliza, de tamaño de grava media (0,6-2 cm), de forma redondeada tabular, sin orientación definida, distribución regular. TEXTURA AL TACTO: Franca. ESTRUCTURA: Muy débil, en bloques subangulares, mediana. COMPACIDAD: Muy compacto, friable. ACTIVIDAD DE LA FAUNA: No aparente. ACTIVIDAD ANTRÓPICA: No aparente. RAÍCES: muy finas, de aspecto global normal. TEST DE CAMPO: Muy alta reacción de la matriz al HCl 11%. ACUMULACIONES: Dominantes (>40% en volumen). LÍMITE INFERIOR: Gradual, plano. HORIZONTE DIAGNÓSTICO: CÁLCICO.

50-170 cm Bwkn

ESTADO DE HUMEDAD: Ligeramente húmedo. ESTADO OXIDACIÓN-REDUCCIÓN: redox: Oxidado. COLOR (de la matriz del suelo): rojo amarillento (7,5YR 5/6) en húmedo. MANCHAS: Inexistentes. ELEMENTOS GRUESOS: algunos (5-15% en volumen), caliza, de tamaño de grava media (0,6-2 cm), de forma redondeada tabular, sin orientación definida, distribución regular. TEXTURA AL TACTO: Franco limoso. ESTRUCTURA: Moderada, en bloques subangulares, grandes. COMPACIDAD: Muy compacto, friable. ACTIVIDAD DE LA FAUNA: No aparente. ACTIVIDAD ANTRÓPICA: No aparente. RAÍCES: muy finas, de aspecto global normal. TEST DE CAMPO: Muy alta reacción de la matriz al HCl 11%. ACUMULACIONES: Dominantes (>40% en volumen). HORIZONTE DIAGNÓSTICO: CÁLCICO.

Datos analíticos

Propiedades químicas

Horizontes (profundidades)	pH H_2O 1:2,5	CE 1:5 (dS/m a 25 °C)	Materia Orgánica (%)	Carbonato cálcico eq %	Caliza Activa (%)
Ap (0-34 cm)	8,6 (8,2-8,6)	0,17 (0,13-0,26)	2,2 (0,7-2,1)	37 (30-55)	5,4 (3,3-14,1)
BC (34-50 cm)	8,9 (8,3-8,8)	0,16 (0,14-0,28)	- (0,2-1,5)	46 (33-55)	6,0 (4,8-15,5)
Bwkn (50-170 cm)	9,0 (8,3-8,8)	0,16 (0,14-0,28)	- (0,2-1,5)	44 (33-55)	6,0 (4,8-15,5)

Humedad y complejo de cambio ($AcONH_4$)

Horizontes (profundidades)	Capacidad de campo (Θ_{-33}) (g H_2O/100g suelo)	Punto de marchitez (Θ_{-1500}) (g H_2O/100g suelo)	CRAD (mm/10 cm)	CIC (cmol(+)kg^{-1})
Ap (0-34 cm)	26 (20-26)	13 (8-13)	19 (15-20)	10 (8-15)
Bkn (34-50 cm)	26 (20-28)	11 (7-14)	21 (15-20)	9 (8-15)
Bwkn (50-170 cm)	24 (20-28)	8 (7-14)	24 (15-20)	7 (8-15)

Granulometría

Horizontes (profundidades)	Arena total (%)	Limo total (%)	Arcilla total (%)	Clase textural (USDA)
Ap (0-30 cm)	42 (24-44)	37 (34-49)	21 (15-29)	Franca
Bkn (30-50 cm)	36 (17-43)	45 (35-58)	19 (18-32)	Franca
Bwkn (50-170 cm)	35 (17-43)	57 (35-58)	8 (18-32)	Franco limosa

(entre paréntesis se indican los percentiles 10 y 90 de la serie de suelos Vilafranca).

4.2.5. Evaluación, con finalidad vitivinícola, de los suelos de la D.O. Penedès

4.2.5.1. Introducción

Los trabajos de zonificación, aplicados a la viña, se han ido generalizando y se han abordado desde distintos puntos de vista: índices bioclimáticos (Fregoni *et al.*,1992; Intrieri *et al.*, 1993; Carbonneau,1999), estudios edáficos y/o geomorfológicos (Falcetti *et al.*, 1992; Fregoni *et al.*,1992; Lebon,1993; ESAV,1996; Morlat, 1997; Gomez-Miguel *et al.* 2000), balance hídrico, agrupación de parcelas a partir de los resultados cualitativos de los mostos y/o vinos obtenidos de ellas (Morlat,1984; Cotencin *et al.*, 1992; Fregoni *et al.*,1992; Barbeau *et al.*, 1998; Vaudour,1998). La información proporcionada por los índices bioclimáticos puede parecer una excelente aproximación, aunque tiene como limitación que sólo es de aplicación directa y significativa en la macrozonación; para estudios de microzonación o mesozonación, la presencia de los otros factores descritos se hace imprescindible.

Así, los conceptos de *terroir*, Unidad de *Terroir* Base (UTB) o de Unidad Natural de *Terroir* Base (UNTB) han ido evolucionando y presentan como característica común la integración de factores edáficos, geomorfológicos y climáticos que determinan un paisaje y, por tanto, las características de los cultivos establecidos en él. Riou (1995) habla de las UNTB como del estudio de la respuesta de la vid a través del vino. Se reconoce la importancia de componentes que definirían las características de una UTB (Lebon *et al.*, 1993; Riou *et al*, 1995; Vaudour *et al.*, 1998), como son la naturaleza y el grado de alteración del material original del suelo y aspectos del paisaje, como la pendiente o la orientación. Pero la descomposición factorial del *terroir* no ha sido resuelta pese a los diferentes trabajos efectuados al respecto y del desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Thélier-Huché y Morlat (2000) observan, por ejemplo, cómo la profundidad del suelo y el grado de intensidad de la alteración de la roca madre parecen tener, en general, mayor influencia que el sistema geológico en el comportamiento edafoclimático de la parcela, aunque se recoce la importancia de la naturaleza litológica en algunas características del viñedo.

Algunos autores se han enfrentado al problema estudiando directamente el paisaje formado más que los factores que lo han determinado, haciendo hincapié en el tipo y diversidad de flora natural, indicadora, a veces, de unas determinadas condiciones de clima, suelo y morfología del territorio. De todo ello, se puede deducir que, cada vez más, el estudio se plantea desde un punto de vista pluridisciplinar (Fregoni *et al.*, 1992). La inclusión del hombre como un factor más, dentro de la aproximación al concepto de *terroir* (Bohmrich, 1996), define la existencia de un papel humano dentro del sistema vitícola, siendo el aspecto comercial una motivación más.

La integración de la información de suelos y de las características geomorfológicas y climáticas, junto a las propias características de portainjertos y variedades, debe permitir una delimitación de áreas con distintas aptitudes para el cultivo de la viña, o de cualquier actividad agrícola en general. En esta dirección, autores como Lavilla, 1990, Jourjon *et al.*, 1991, Riou *et al.*, 1995, Vaudour, 1998 y Girbault y Morlat, 1999 han dirigido ya sus estudios, aunque la metodología para la integración de múltiples factores resulta extremadamente más compleja y necesita soportes informáticos con características de SIG.

Para la evaluación realizada en este trabajo se partió de los resultados del Mapa de Suelos (1:25.000) de Cataluña, adaptando una metodología general de evaluación del territorio (FAO, 1976; Boixadera y Porta, 1991), en la parte central de l'Alt Penedès (Herrero *et al.*, 2001). En el posterior trabajo de cartografía (DAR, 2008) la evaluación se extendió a todo el ámbito de la DO Penedès. Con ello se elaboraron distintos mapas temáticos e interpretativos de la aptitud que permitieran a agricultores y técnicos la identificación de la propia parcela de cultivo.

4.2.5.2. Metodología para la obtención de mapas temáticos, de potencial de vigor y de aptitud de portainjertos y variedades

La expresión 'Land Evaluation' (evaluación de suelos) define el proceso de juzgar el comportamiento de un uso del territorio mediante la ejecución o interpretación de estudios y cartografías de suelos, geomorfología, vegetación, clima y otros aspectos del territorio. La finalidad de la evaluación de suelos es identificar y realizar una comparación de los tipos de usos más prometedores en relación a las unidades específicas del territorio y en términos aplicables a los objetivos de la clasificación (FAO, 1976).

La metodología empleada se basa en el sistema FAO (1976), cuyos fundamentos siguen plenamente vigentes como reconoce la propia organización en una revisión reciente de dicha metodología (FAO, 2007), y utiliza criterios de clima y geomorfología, denominándose en este caso evaluación del territorio (Boixadera y Porta, 1991). Las unidades cartográficas de evaluación se han obtenido a partir del Mapa de Suelos 1:25.000, con apoyo de un modelo digital del terreno (MDT), de fotointerpretación y de trabajo de campo.

Se ha hecho una simplificación formal para facilitar todo el proceso. Siguiendo la terminología FAO, los requerimientos de uso los han facilitado los técnicos vitivinícolas que conocen a fondo el comportamiento de portainjertos y variedades en diferentes lugares, y especialmente en el Penedès.

La metodología FAO de evaluación se fundamenta en comparar cualidades del territorio con requerimientos de uso, definido éste con un considerable grado de detalle. En este caso, y a pesar de la importancia que demuestran muchos de los factores del territorio, se ha dado mayor peso a los suelos y tan sólo se han considerado, de forma complementaria, los aspectos climáticos (heladas, altitud, exposición) y geomorfológicos (fondos, vertientes, terrazas).

A partir del MDT, se pueden hacer análisis de la pendiente de una determinada parcela, así como de su curvatura (cóncava o convexa) y orientación (exposición solar). Por otra parte, a partir de los datos climáticos de las estaciones cercanas se obtiene la integral térmica efectiva.

Las propiedades y características de los suelos empleados en la evaluación se recogen en la tabla 2.

TABLA 2. Propiedades y características de los suelos de la DO Penedès utilizados en la evaluación con fines vitivinícola

Tipo de propiedad	Propiedad
Topografía y posición	Pendiente
	Posición geomorfológica
Propiedades físicas	Profundidad efectiva de enraizamiento
	Material subyacente
	Cantidad de gravas superficiales
	Contenido de elementos gruesos en el perfil
	Textura
	Capacidad de retención de agua
	Presencia de afloramientos rocosos
	Drenaje
Propiedades químicas	Contenido de materia orgánica
	Contenido de carbonato cálcico equivalente
	Contenido de caliza activa
	Reacción del suelo
	Salinidad

La comparación "cualidades del territorio–requerimientos de los usos" (portainjertos o variedades) ha permitido determinar los niveles de aptitud.

Los resultados se presentan en forma de mapas, para cada patrón (figura 2) y para cada variedad (figura 3), según el destino enológico (vino base para cava, vino blanco tranquilo para

las variedades de uva blanca y vino tinto para las variedades de uva tinta). Se establecen 3 niveles o categorías de uso asimilables a los niveles de aptitud de FAO (FAO, 1976):

— **recomendable**, (adaptación óptima cultivo-unidad cartográfica de evaluación).

— **utilizable** (requiere un manejo especial del cultivo y/o la parcela).

— **no recomendable** (limitaciones que desaconsejan la utilización del patrón o variedad).

Esta última, comprendería aquellos casos en que no se recomienda el uso porque las restricciones (encharcamiento, heladas primaverales, elevada fertilidad del suelo, escasez de agua, etc) son tan importantes que dificultan la viabilidad económica, o la obtención de un mosto con calidad suficiente para un determinado objetivo enológico.

El sistema de evaluación elegido corresponde a un primer nivel de zonificación, válido para una zona de la extensión de la del ámbito geográfico de la DO Penedès. Un mayor grado de detalle requiere cartografías mas detalladas como han puesto de manifiesto los trabajos de Ubalde, 2010 y Ubalde *et al.*, 2011. Asimismo hay que tener en cuenta que los usos considerados en esta evaluación no dejan de ser más que un número limitado de los posibles escenarios que pueden ser de interés en un momento dado. La base de datos georreferenciada, creada en la realización de este trabajo, ha de permitir llevar a cabo estas nuevas evaluaciones con relativa facilidad, sin más que desarrollar las nuevas tablas de especificaciones necesarias.

3) Mapas temáticos

Los mapas temáticos son aquellos que representan la distribución de un determinado parámetro químico o característica física de interés en el área de estudio. Son de obtención directa a partir del Mapa de Suelos 1:25.000. Entre los más interesantes, en el ámbito de la DO Penedès se encuentran: el mapa de la distribución de la caliza activa, la profundidad enraizable, la capacidad de retención de agua disponible y el contenido de elementos gruesos en la profundidad enraizable.

b) Determinación de la aptitud para portainjertos

Los portainjertos evaluados fueron: 110 R, 41 B, SO4, 1103 P y 140 Ru. Se seleccionaron por ser los que más se adaptan a las características del Penedès como demuestra su mayor distribución.

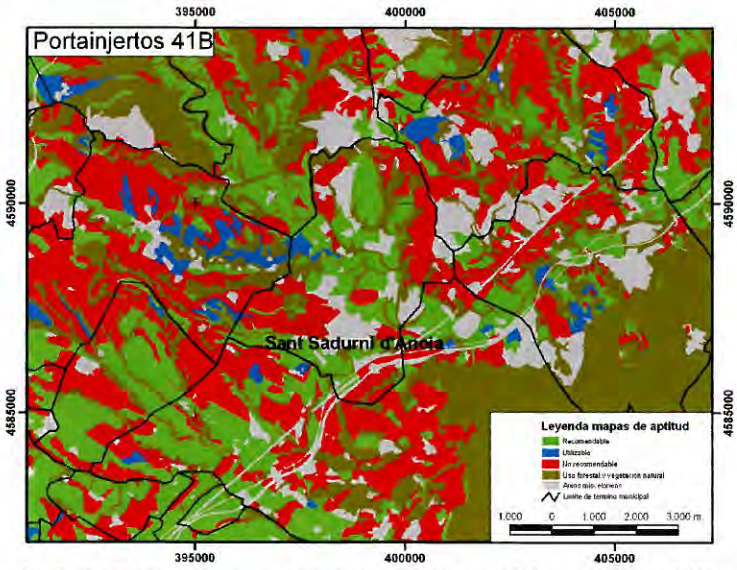


FIGURA 2. Ejemplo del mapa de aptitud obtenido para uno de los portainjertos (41B).

El pie 41-B es el más tradicional. Se adapta a todo tipo de suelos; presenta buena tolerancia a los carbonatos, a la sequía moderada y hermana muy bien con todas las variedades. Además, tiene suficiente resistencia a la filoxera, si bien el hecho de que induzca poco vigor puede dar problemas en suelos de baja fertilidad y años muy secos. Hay que señalar, como característica esencial, que no favorece la podredumbre.

El pie SO4 mejora la productividad de las cepas. En variedades, como Macabeo, Parellada y Chardonnay, favorece la podredumbre y produce vinos de calidad inferior.

El 140 Ruggieri es un pie de reciente introducción, que tiene condiciones óptimas en los suelos más pobres en nutrientes. Al igual que el 41-B, no favorece la podredumbre. Se trata de un portainjertos muy resistente a la sequía; sin embargo, en suelos fértiles y con suficiente aporte de agua produce plantas muy vigorosas, lo que puede favorecer la podredumbre.

El 110-R es un pie que tiene interés para las variedades de uva tinta como la Garnacha, Tempranillo, Merlot, Cabernet Sauvignon y el Pinot Noir. Mejora bastante la graduación y la calidad de la uva y del vino. Sin embargo, resulta poco adecuado en las variedades como Chardonnay y Macabeo, muy sensibles a la podredumbre.

Las cualidades del suelo utilizadas para la delimitación de las zonas de aptitud de cada patrón han sido:

— contenido de caliza activa, como estimador de la susceptibilidad a la clorosis férrica.

— clase de drenaje relacionada con los problemas de asfixia y como estimador de la disponibilidad de oxígeno por las raíces.

— capacidad de retención de agua disponible (CRAD) como estimador de la disponibilidad de agua que determina la fertilidad, la expresión de vigor vegetativo y la susceptibilidad a la sequía.

Los valores umbral de cada cualidad para cada portainjerto, descritos en la tabla de especificaciones (tabla 3), se han establecido a partir de la bibliografía general y de los estudios localizados en la región (Mínguez, 1981). Estas cualidades se han clasificado según su importancia para cada portainjerto.

TABLA 3. Factores limitantes para la elección de los portainjertos

Portainjerto	Factor 1 Caliza activa	Factor 2 Drenaje/ CRAD	Factor 3 CRAD/ Drenaje
110-R	N > 15%	N Drenaje deficiente	U. CRAD muy alta, elevada, muy baja
		U. Drenaje limitado	
	R. ≤ 15 %	R. Buen drenaje	R. CRAD moderada, baja
1103-P*	N > 15%		N CRAD muy alta, elevada, moderada
		U. Drenaje limitado, bueno	U. CRAD muy baja
	R. ≤ 15 %	R. Drenaje deficiente	R. CRAD baja
SO4	N > 17%	N CRAD baja, muy baja	
		U. CRAD moderada, alta	U. Drenaje limitado, bueno
	R. ≤ 17 %	R. CRAD muy alta	R. Drenaje deficiente
140-Ruggieri	N > 30%	N CRAD muy alta, elevada, moderada	N. Drenaje deficiente, limitado
		U. CRAD baja	U. Buen drenaje
	R. ≤ 30 %	R. CRAD muy baja	
41-B	N > 30%	N CRAD baja, muy baja	N. Drenaje deficiente
		U. CRAD moderada	U. Drenaje limitado
	R. ≤ 30 %	R. CRAD muy alta, elevada	R. Buen drenaje

RRR, RRU= Recomendable
RUR o RUU = Utilizable
N = No recomendable

El potencial de vigor del suelo (PVT) se estima a partir de tres variables que se pueden cartografiar directa o indirectamente:

— El tipo de material subyacente, que aparece antes de 1,20 m.

— La capacidad de retención de agua disponible (CRAD).

— El tipo de unidad geomorfológica y su pendiente.

Para su cálculo, se asigna un coeficiente de vigor a cada una de estas variables en función del presumible efecto que, cada una de ellas, ejerce sobre el nivel de vigor conferido por el suelo (tabla 4). Cada variable oscila entre 1 (potencial de vigor más débil) y 3 (potencial de vigor más fuerte). En este algoritmo no se incluye el contenido en nutrientes (N,P,K) del suelo que depende en gran parte de las prácticas del viticultor.

TABLA 4. Criterios utilizados para calcular el potencial de vigor (adaptado de Morlat 2001)

Variable *i*	Coeficiente de vigor	Modalidad		Nota	
Material subyacente	1/3	Duro (roca calcárea, petrocàlcico)		1	
		Medio (hipercálcico, margas)		2	
		Blando (detrítico terrígeno)		3	
Capacidad de retención de agua disponible (CRAD)	2	Muy baja		1	
		Baja		1,5	
		Moderada		2	
		Alta		2,5	
		Muy alta		3	
Geomorfología y pendiente	1		<5% o bancales	5-10%	10-20%
		Formas suaves	1,5	1,25	1
		Terraza	2	1,5	1,25
		fondo	3	2	1,5

El valor final del PVT se obtiene según la siguiente expresión matemática:

$$PVT = \sum_{i=1}^{3} ((Coeficiente\ de\ vigor\ i) \times (Nota\ i))$$

El valor final del potencial de vigor, calculado en cada uno de los puntos de muestreo, varía entre 0 (potencial de vigor nulo) y 9 (potencial de vigor fuerte), interpretándose los valores según se indica en la tabla 5.

TABLA 5. Interpretación del potencial de vigor

PVT	Interpretación
0-2	Nulo
2,01-4	Muy débil
4,01-5	Débil
5,01-6,5	Moderado
6,51-7,5	Fuerte
7,51-10	Muy fuerte

Además de las variedades de vid utilizadas en el Penedès, a la hora de elaborar los productos vitícolas se ha de tener en cuenta su vocación; así tendremos las variedades blancas para vino blanco, las variedades blancas para cava y las variedades tintas para la obtención de vino tinto.

Las variedades blancas más importantes dentro del ámbito geográfico de la Denominación de Origen Penedès, para las que se realizó la evaluación son:

Introducida en el Penedès en los años sesenta y aclimatada con éxito. Con esta variedad se elaboran vinos blancos jóvenes y muy afrutados. También se utiliza para la elaboración de cava porque aporta una fina fragancia.

Una de las variedades tradicionales, propia de la zona del bajo y medio Penedès. Junto a las variedades Macabeo y Parellada, forma parte del "ensamblaje" del cava tradicional.

Parellada: Es la más fina de las variedades blancas tradicionales del Penedès. Produce blancos aromáticos, secos, de graduación moderada, aroma fresco y una delicada acidez afrutada.

Macabeo: Se encuentra básicamente en el Penedès Central; es la variedad que aporta al cava su aroma afrutado y su rica sabia. Produce los vinos blancos secos y afrutados considerados como los más típicos de la DO Penedès.

Las variedades tintas más importantes dentro del ámbito geográfico de la Denominación de Origen Penedès son:

Garnacha: Variedad tradicional del Mediterráneo que se encuentra en las tierras más cálidas del Baix Penedès. Se encuentra siempre presente en los vinos rosados afrutados del Penedès, produce vinos con buena graduación y cuerpo, aptos para el envejecimiento en roble.

Merlot: Se encuentra en el Penedès Central y sirve para elaborar excelentes vinos varietales y aromáticos vinos jóvenes. Da lugar a vinos corpulentos y con muchos taninos. Además conjuga muy bien con otros caldos.

Cabernet Sauvignon: Los vinos son de color intenso, demostrando un carácter distintivo y clase entre el resto de variedades tintas. Sus aromas se hacen más complejos con el envejecimiento. Es una variedad que se cultiva en el centro y norte del Penedès.

Tempranillo: Los vinos resultantes son de buena graduación alcohólica, con una moderada acidez afrutada y buena perspectiva aromática. Es una variedad tradicional que se encuentra en el sur y centro del Penedès.

Se han evaluado 4 variedades de uva con vocación para elaborar cava, 4 variedades de uva con vocación para elaborar vino blanco tranquilo y 3 variedades de uva con vocación para elaborar vino tinto.

Las cualidades del territorio consideradas han sido:

— Climáticas: riesgo de heladas, insolación y contraste térmico día/noche. Estas cualidades se han estimado a nivel microclimático, indirectamente a partir de la altitud, la posición geomorfológica y la experiencia en la zona.

— Geomorfológicas: posición geomorfológica (fondo, ladera) y grado de la pendiente.

— Edáficas: clase de drenaje, CRAD (como estimador de fertilidad, del vigor potencial y del riesgo de sequía) y contenido de elementos gruesos en superficie.

Estas cualidades se han ordenado, en función de su importancia, para cada variedad y destino enológico. Los umbrales se han establecido a partir de la bibliografía general, de los estudios locales realizados en la región (Mínguez y Parejo, 1982) y de las recomendaciones de los expertos locales. El valor umbral para las cualidades empleadas ha variado en función de la orientación vitícola considerada, siendo progresivamente más restrictivo al referirse a los destinos vino blanco base para cava, vino blanco tranquilo y vino tinto. Finalmente, se señala como hipótesis de trabajo que el portainjerto elegido en cada caso es plenamente compatible con la variedad.

La descripción de las cualidades utilizadas en la evaluación es la siguiente:

Cualidad 1: Disponibilidad de temperatura (contraste día-noche). Inferida a partir de la cota del terreno (obtenida a partir del MDT del *Institut Cartogràfic de Catalunya*, con una resolución de 15 x 15 m).

Cualidad 2: Riesgo de heladas. Estimado a partir de la posición fisiográfica. Para delinear estas áreas se ha hecho una fotointerpretación específica complementada con trabajo de campo, en parte realizada durante de elaboración del mapa de suelos.

Cualidad 3: Disponibilidad de agua. Estimada a partir de la CRAD. Se utiliza como indicador del vigor y la producción.

Cualidad 4: Condiciones de aireación. Estimada a partir de la clase de drenaje y, en ciertos casos, del porcentaje de elementos gruesos en la profundidad enraizable.

Cualidad 5: Insolación. Estimada a partir de la pendiente y la orientación (exposición solar). Se han obtenido a partir del MDT del ICC con una resolución de 15 x 15 m y mediante trabajo de campo.

Como en el caso de los portainjertos, se ha procedido a una gradación de las cualidades, asignándoles diferente peso según la orientación productiva y variedad considerada, y contrastando los resultados con expertos locales. La tabla 6 presenta un ejemplo de las especificaciones utilizadas en la evaluación de variedades de uva blanca con destino a vino base para cava. La tabla 7 presenta un ejemplo de asignación de los niveles de aptitud en dicha evaluación.

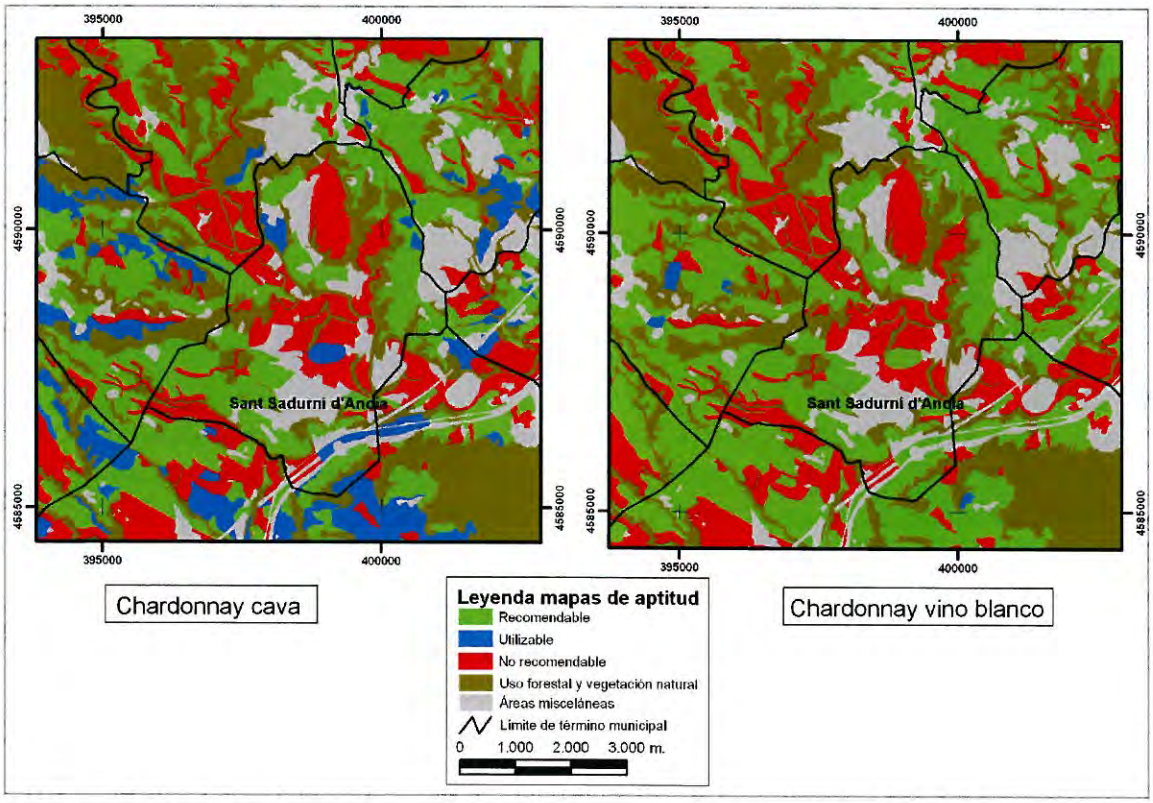


FIGURA 3.- Ejemplo de mapas de aptitud obtenidos para la variedad Chardonnay para elaboración de cava y de vino blanco

TABLA 6. Factores limitantes para la evaluación de variedades de uva blanca con destino a vino base para cava

Variedades	Factor 1 Altitud	Factor 2 Fisiografía	Factor 3 Drenaje	Factor 4 CRAD	Factor 5 Pendiente (%)
Chardonnay	R. Alt.> 100 m U. Alt. ≤ 100 m	N. Fondo	R. Buen drenaje U. Drenaje limitado N Drenaje deficiente	R. CRAD baja, muy baja U. CRAD alta, moderada N CRAD muy alta	R. >5%
Macabeo		N. Fondo	R. Buen drenaje U. Drenaje limitado N Drenaje deficiente	R. CRAD baja U. CRAD moderada, alta N CRAD muy baja, muy alta	R. >5% U. 2-5% N. <2%
Xarel·lo	N. Alt.> 300 m	U. Fondo	R. Buen drenaje U. Drenaje limitado N Drenaje deficiente		R. >5% U. ≤5%
Parellada	R Alt >300 m U. 200-300 N Alt <200 m		R. Buen drenaje U. Drenaje limitado N Drenaje deficiente	R. CRAD baja , muy baja U. CRAD moderada N CRAD alta, muy alta	

R= Recomendable; U= Utilizable; N= No recomendable

TABLA 7. Asignación de los niveles de aptitud en la evaluación de variedades de uva blanca con destino a vino base para cava

Variedades	Recomendable	Utilizable	No recomendable
Chardonnay	Máximo 2 factores = U	Máximo 4 factores = U	Cualquier factor = N
Macabeo	Máximo 1 factor = U	Máximo 3 factores = U	Cualquier factor = N
Xarel.lo	Máximo 1 factor = U	Máximo 3 factores = U	Cualquier factor = N
Parellada	Máximo 1 factor = U	Máximo 3 factores = U	Cualquier factor = N

4.2.5.3. Principales resultados de la evaluación

Los mapas para portainjertos y variedades obtenidos (figuras 2 y 3) muestran el diferente grado de aptitud del suelo: Recomendable, Utilizable o No recomendable.

Los factores clase de drenaje y CRAD han posibilitado una buena discriminación de la aptitud de las distintas unidades de suelos en el caso de los portainjertos. Morlat (1997) considera, además de los 3 factores citados, la pedregosidad y la dureza de la roca. La pedregosidad afecta propiedades como el drenaje, la capacidad de retención de agua, el clima del suelo y la evaporación. Las dos primeras han sido consideradas explícitamente en el trabajo de evaluación y las dos últimas presentan una influencia de difícil valoración para la recomendación de portainjertos. La importancia de la dureza de la roca es escasa en esta cartografía debido a la elevada profundidad de los suelos y a una CRAD muy alta. Además ya se ha tenido en cuenta porque la CRAD está condicionada por la enraizabilidad del material, aunque podría considerarse en futuros trabajos de zonificación, así como la compacidad (por su importancia en el establecimiento y distribución radicular).

Los resultados obtenidos en el área estudiada muestran gran coherencia con la realidad vitícola tradicional. En cuanto a la vocación, las parcelas destinadas a vino blanco tranquilo,

representarían una menor superficie respecto al destino vino base para cava, ya que las producciones y composición del mosto exigibles son distintas en ambos casos: así para el vino base para cava se suele preferir, en términos generales, aquellos con una mayor acidez, menor grado alcohólico, poco oxidados y pálidos, mientras que para vinos blancos tranquilos se escogen los mostos mas concentrados, de mayor graduación y con un mayor grado de maduración. Dentro de la amplia gama que permite el manejo vitícola el primer caso se asocia a las situaciones mas productivas, mientras el segundo lo estaría a aquellos en que es mas fácil obtener una mayor maduración y grado alcohólico. Esta tipología no sólo esta relacionada con suelos de mayor o menor productividad, sino también a otros factores que pueden inducir mejor maduración, por ejemplo. En cualquier caso, el Xarel·lo sería la variedad más recomendada.

Respecto a las variedades de uva tinta, la exigencia de una óptima acumulación de azúcares y maduración fenólica de la uva ha conducido a que pocas zonas sean utilizables para su cultivo y que no aparezcan muchas áreas recomendables para las variedades tintas. Este hecho parece derivar de la elevada fertilidad que presentan los suelos, con unas texturas mayoritariamente francas a franco-arcillosas y con pocos elementos gruesos, además de una elevada profundidad enraizable. Otro motivo a añadir es la escasa oscilación térmica en buena parte del ámbito geográfico que sólo se hace mayor en las partes mas elevadas de la zona interior del Penedès y que parece necesaria para un correcto desarrollo de la pigmentación.

Para las variedades de introducción más reciente, como es el caso del Chardonnay y las variedades tintas, la distribución parece efectuarse independientemente del tipo de suelo, a pesar de que el progresivo conocimiento de su comportamiento en la zona debería aproximarla a la modelizada. Observaciones parecidas han sido recogidas por Thélier-Huché y Morlat (2000) en un estudio realizado en la zona de Anjou.

Como reflexión final, en relación a los mapas de aptitud de variedades, cabe reseñar que el trabajo de zonificación realizado ha tenido como hipótesis básica el cultivo en secano de la vid. La presencia de un sistema de riego modificaría las características reales de la parcela, ya que conceptos como la CRAD, la pluviometría o algunos de los índices bioclimáticos utilizados en muchos de los sistemas de zonificación tendrían otro sentido al actual. Ésta sería la prueba más contundente de cómo la gestión de la parcela y las técnicas culturales empleadas pueden hacer posible el cultivo de una determinada variedad en una parcela, a priori, desestimable en otras condiciones. Por este motivo, en ningún caso se niega la posibilidad de utilización de un portainjerto o variedad, si bien se advierte de que existen características limitantes para el cultivo. El conocimiento de la realidad de la parcela y las posibilidades técnicas disponibles para cada viticultor y área de cultivo marcarán finalmente la posibilidad real de cultivo.

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración técnica de los especialistas en viticultura del DAAM: A. Vilarroya y J. Sella; del INCAVI: C. Domingo, L. Giralt y S. Minguez; de la ADV Vitioleicultores Baix Penedès-Garraf: J. Mirall; de los consejos reguladores de la DO Cava y DO Penedès y del Consell Comarcal de l'Alt Penedès.

Por supuesto, a todos los técnicos agrónomos y forestales que a lo largo de estos años han participado en los trabajos de cartografía de los suelos del área y su evaluación: E. Ascaso; J. Baldrich; M. Julian; G. Carrillo; M. Vicens; J.M. Raluy; M.A. Argilés; M. Burriel; B. Blasi; E. Carrillo; O. de Cirugeda; M. Garrido; J. Llauradó; J.M. Llop; J.C. Loaiza; J. Manent; L. Margalló; J. Mateos; J. Nogués; J.M. Pijuan; O. Palou; C. Rúbies; M. Salazar; J. Sánchez; I. Simó; J. Vallverdú y P. Villar.

A los anónimos revisores que con sus comentarios han contribuidos a mejorar substancialmente el texto inicial.

Y por último queremos dedicar este trabajo a la memoria de Oriol Bustos, que tanta ilusión puso en la elaboración del Mapa de sòls (1:25.000) de l'àmbit geogràfic de la Denominació d'Origen Penedès, cuya vida fue malograda en un desgraciado accidente de tráfico.

4.2.6. Referencias bibliográficas

BARBEAU, G., ASSELIN, C., MORLAT, R. "Estimation du potenciel viticule des terroirs en Val de Loire selon un indice de précocité du cycle de la vigne". Bull. De l'OIV, 805-806. (1998), p. 247-262.

BECH, J. "6th Internacional Meeting on Soils with Mediterranean type of Climate" 4-9 july 1999. Universitat de Barcelona. 137 p.

BOHMRICH, R. "Terroir: competing perspectives on the roles of soil, climate and people". Journal of Wine Research, vol. 7 (1) (1996), p. 33-46.

BOIXADERA, J. "Área modelo de conservación de suelos en Piera-Masquefa". PFC. Escola Tècnica Superior d'Enginyers Agrònoms de Lleida, Lleida. (1983).

BOIXADERA, J. y PORTA, J. "Información de Suelos y Evaluación Catastral: Método del Valor Índice". C.G.C.T. Monografías 3. Mº de Economía y Hacienda. Madrid. (1991), 151 p.

CARBONEAU, A. (OIV, Grup d'Experts, Zonage Vitivinicole-8/3/99).

CARRILLO, E.; CARRILLO, G.; HERRERO, C.; MARGALLÓ, L.; BURRIEL, M. "Mapa de sòls (1:25.000) de Cataluña. TM de Sant Climent de Llobregat". Baix Llobregat. DAR- Lleida, (2007).

CBDSA. "Sistema de información Edafológica y Agronómica de España. SINEDARES. Manual para la descripción codificada de suelos en el campo". MAPA, Madrid. (1983), 137p.

COTENCIN, R.; GALANT, P.; ROUSTAN, B. "Terroir viticole et typicites organoleptiques: proposition d'un systeme applicable à la gestion des vignobles". Rev. Française d'Oen, núm.139. (1992), p. 59-63.

DAR "Mapa de sòls (1:25.000) de l'àmbit geogràfic de la Denominació d'Origen Penedès". Vilafranca del Penedès-Lleida. (2008).

ESAV. "I suoli dell'area a doc del Piave" Ed. Ente di Sviluppo Agricolo del Veneto. (1996).

FALCETTI, M.; PINZAUTI, S.; SCIENZA, A. "La zonazione dei terreni vitali del Trentino. Aspetti pedologici e nutrizionali". Vignevini, núm.9. (1992), p. 57-64.

FAO "A framework for land evaluation" (1976) FAO Soils Bull. n. 32, Roma.

FAO. "Land evaluation. Towards a revised framework". Land and water discusión, paper 6, (2007), 107p.

FREGONI, M.; ZAMBINI, M.; BOSELLI, M.; FRASCHINI, P.; SCIENZA, A.; VALENTI, L.; PANONT, A.; BRANCADORO, L.; BOGONI, M.; FAILLA, O.; FILIPPI, N.; LARUCCIA, N.; NARDI, I.; LEGA, P.; ZINONI, P.; LIBÈ, A. "Ricerca pluridisciplinare per la zonacione viticola della Vall Tidone (Piacenza, Italia)". Vignevini núm.11. (1992), p.53-80.

GIRBAULT, P.; MORLAT, R. "Etat des travaux en France sur les méthodes de zonage vitivinicole". OIV, Grup d'Experts. (1999).

GOMEZ -MIGUEL, V.; SOTÉS, V. "Utilización de los estudios detallados y muy detallados de suelos en la microzonificación vitícola". III Simposio Internacional zonificación vitivinícola. Puerto de la Cruz, Tenerife. (2000).

GRUP DE TREBALL 'NOMENCLATURA D'HORITZONS DE SÒLS' "Denominació d'horitzons genètics (i capes)" Secció de Sòls de la ICEA i Delegació Territorial de la SECS. Quaderns agraris 16, desembre 93. pag.: 111-126.

HERRERO, C.; SELLA, J.; VILLAROYA, A.; ESPINÀS, E.; SIÓ, J; ROSERA, J.; BOIXADERA, J. "Zonificación vitícola del Penedès: Aplicación a un área modelo" Viticultura/Enologia Profesional, núm. 73. (2001), p.35-46.

INTRIERI, C.; FILIPPETTI, I.; SILVESTRONI, O.; MARCHEGIANI, E.; MURRI, A. "Zonazione bioclimatica e primi rilievi fenologici nella viticoltura della Regione Mearche". Vignevini núm. 6. (1993), p.62-68.

JOSA, R. "Estudi cronoseqüencial de sòls sobre les terrasses de l'Anoia (entre el Bedorc i Gelida)" Tesi de Grau. Universitat de Barcelona. (1985), 122 p.

JOURJON, F.; MORLAT, R.; SEGUIN, G. "Caractérisation des terroirs viticoles de la moyenne Vallée de la Loire. Parcelles expérimentales, climat, sols et alimentation en eau de la vigne". Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin, 25(4). (1991), p.179-202.

LAVILLE, P. "Le terroir, un concept indispensable à l'élaboration et à la protection des appellations d'origine comme à la gestion des vignobles le cas de la France" OIV, (63) 709-710. (1990), p.217-241.

LEBON, E.; DUMAS, V.; METTAUER, H.; MORLAT, R. "Caractérisation intégrée du vignoble alsacien: aspects méthodologiques et application a l'étude des composantes naturelles des principaux terroirs" J.Int.Sc.V.V, 27(4). (1993), p.235-253.

MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A. "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." Tesis Doctoral. Universitat de Lleida, Lleida (1998).

MÍNGUEZ, S. "Implantació racional de la vinya a Cataluña-II. Elecció del portaempelt" INCAVI Quaderns de divulgació tècnica, núm. 4. (1981).

MÍNGUEZ, S.; PAREJO, J. "Implantació racional de la vinya a Cataluña-I. Elecció de la varietat" INCAVI Quaderns de divulgació tècnica, núm. 3. (1982).

MORLAT, R. "Le milieu viticole sa caractérisation intégrée et son influence sur le vin (Application au vignoble rouge du Val de Loire)". (1984) OIV, 57-643-644: 707-728.

MORLAT, R. "Terroirs d'Anjou: objectifs et premier résultat d'un étude spatialisée à l'échelle régionale" OIV, 70-797-798. (1997), p.567-591.

MORLAT, R.; ASSELIN, C.; PAGES, J.; LEON, H.; ROBICHET, J.; REMOUE, M.; SALETTE, J.; CAILLE, M. "Le milieu viticole sa caractérisation intégrée et son influence sur le vin (Application au vignoble rouge du Val de Loire)" OIV, 57-643-644. (1984), p.707-728.

MORLAT, R. "Terroirs viticoles: Étude et valorisation" Ed. Oenoplurimédia Sarl. Chaintré. France (2001). 120p.

NOGUÉS, J; SALAZAR, M.; BOIXADERA, J. "Mapa de sòls de Cataluña 1:25.000. TM de la Granada, Les Cabanyes, Pacs, Santa Fe i Vilafranca del Penedès. (Alt Penedès)". SARA-DARP. Lleida, (1999), 144p.

RIOU, C.; MORLAT, R.; ASSELIN, C. "Une approche intégrée des terroirs viticoles Discussions sur les critères de caractérisation accesibles". OIV 767-768. (1995). p.93-106.

SSS - Soil Survey Staff. "Keys to Soil Taxonomy" SMSS. Tech. Mon. 6. Blacksburg, Virginia. (1994), 422p.

SSS - Soil Survey Staff. "A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys". 2nd edn. US Dep. Agricult. Nat. Res. Cons. Serv., Washington, DC, Agriculture Handbook (1999), 436p.

UBALDE, J.M. "Quantifying the effects of soil and climate on grape and wine quality: Application in a Viticultural Zoning based on very detailed Soil Surveys" Tesi Doctoral. Universitat de Lleida (2010).

UBALDE, J.M.; SORT, X.; POCH, R.M. "Influence of soil forming processes on soil-based viticultural zoning". J. Soil Sci. Plant Nutr. 11(1), (2011), p.100-126.

VAUDOUR, E. "Caractérisation spatiale des terroirs et constitution des raisins en A.O.C. Côtes-du Rhône meridionales (Bassin de Nyons- Valreas)".J.Sc.V.V., 32(4). (1998), p. 169-182.

4.3. Problemas de erosión en los suelos del Penedès

José A. Martínez-Casasnovas[1] y M. Concepción Ramos[1]

(1) Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo. Universitat de Lleida. Av. Rovira Roure 191, 25198 Lleida (España).

Resumen

El presente capítulo, de la Guía de campo de la 28 Reunión de Ciencia del Suelo de la SECS, muestra algunos resultados de cuantificación de la erosión por cárcavas y barrancos y en parcelas de viña en un área de la DO Penedès, que ha sido estudiada por los autores desde la década de 1990. En estos estudios se han desarrollado y aplicado, a escala semidetallada y detallada, metodologías basadas en el uso de tecnologías de la información geográfica que han permitido, además de ofrecer información sobre la localización de este tipo de procesos erosivos, la cuantificación de las tasas de erosión y la evaluación e , incluso, la estimación de estos procesos a nivel económico.

4.3.1. Introducción

Dentro del área mediterránea del NE de España, una de las zonas de mayor tradición en el cultivo de la viña es la que incluye la DO Penedès. La zona en la que se centra este análisis se localiza entre las comarcas de l'Alt Penedès y l'Anoia (zona denominada en este trabajo como Alt Penedès – Anoia), donde se producen importantes procesos de erosión. A escala regional, el rasgo fundamental de esta zona es la incisión de una densa y profunda red de cárcavas y barrancos, excavada en los materiales litológicos poco coherentes que afloran en la Depresión Terciaria del Penedès (lutitas miocenas con paleocanales de gravas sin cementar), hecho que se puede observar tanto en campo como a partir de imágenes de satélite (figura 1). Una de las consecuencias más graves de este tipo de procesos erosivos es la disección de las parcelas, que conlleva la dificultad para el tránsito de la maquinaria y la pérdida de superficie agrícola útil (Boixadera, 1983; Porta *et al.*, 1994; Martínez-Casasnovas *et al.*, 2003).

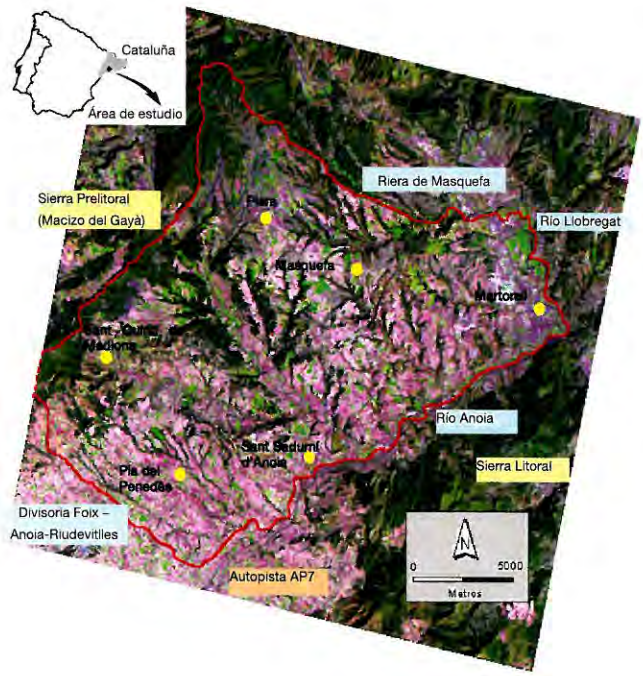


FIGURA 1. Localización del área de viña en las comarcas de l'Alt Penedès y l'Anoia (Imagen Landsat 5 TM), con una superficie aproximada de 30.000 ha. Fuente: Martínez-Casasnovas, 1998.

La mayor tecnificación de la producción vitícola, llevada a cabo a partir de las décadas de 1960 y 1970, sorprendentemente no ha conllevado una preocupación por la conservación del recurso suelo, consecuente con una sostenibilidad de los usos actuales. La tecnificación ha supuesto en la práctica el rediseño de la mayoría de las plantaciones de viña y, de hecho, la desaparición de muchas de las medidas tradicionales de conservación de suelos. Esto ha reactivado los diferentes tipos de procesos erosivos, incrementándose las pérdidas de suelo. A escala de parcela, los procesos de erosión más comunes en esta área son la erosión por salpicadura, la erosión

laminar difusa y la erosión por escorrentía superficial concentrada, si bien se pueden producir procesos de sofusión debidos a flujo subsuperficial. En diversos trabajos previos realizados en esta zona se han estimado pérdidas de suelo debidas a procesos de erosión laminar y por arroyaderos superiores a 12 Mg ha^{-1} $año^{-1}$ (López, 1994; Usón, 1998).

Al igual que ha ocurrido en otras áreas de estudio, donde la investigación de la erosión se ha centrado principalmente en estudiar los procesos de erosión laminar y por surcos (Poesen *et al.*, 1998, 2006), en la zona Alt Penedès – Anoia no se disponía a priori de información de cual era la afectación a escala regional de estos fenómenos erosivos, ni de las tasas de erosión. Lo que sí se conocía es que la erosión en esta región viene condicionada por procesos tectónicos que han tenido lugar a escala regional (Gallart, 1981), estando determinada en la actualidad por la fuerte influencia de la actividad humana, especialmente por la gran extensión que ocupan los cultivos como la viña y por el abandono de las medidas tradicionales de conservación de suelos.

En este contexto, el presente capítulo de la Guía de campo de la 28 Reunión de Ciencia del Suelo de la SECS muestra algunos resultados de cuantificación de la erosión por cárcavas y barrancos, y en parcelas de viña en el Alt Penedès – Anoia (DO Penedès) que ha sido estudiada por los autores desde la década de los 90. En estos estudios se han desarrollado y aplicado, a escala semidetallada y detallada, metodologías basadas en el uso de tecnologías de la información geográfica que han permitido, además de ofrecer información sobre la localización de este tipo de procesos erosivos, la cuantificación de las tasas de erosión y la evaluación, incluso haciendo estimaciones a nivel económico (Martínez Casasnovas *et al.*, 2002; Martínez Casanovas *et al.*, 2005; Martínez-Casasnovas y Ramos, 2006).

4.3.2. Localización y características del área de estudio

La zona estudiada incluye unas 30.000 ha, localizadas en las comarcas de l'Alt Penedès y l'Anoia, en la provincia de Barcelona (figura 1), dentro de la cual se seleccionaron áreas modelo de menor tamaño para llevar cabo estudios de más detalle. 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 – Riudevitlles y de la cuenca del río Foix, arroyo de l'Avernó y río Anoia (en la zona del escarpe de la falla Martorell – Gelida). Los depósitos donde se excavan los barrancos están compuestos principalmente por lutitas, con una densidad aparente de 1,80±0,12 Mg m^{-3} y textura franca a franco arenosa (Martínez-Casasnovas, 1998; Usón, 1998; Nacci, 2001). El contenido medio de carbonato cálcico es de 36,7±13,1%, la conductividad eléctrica es $CE_{1:5}$= 0,19±0,1 dS m^{-1} y tienen una SAR (Relación de Adsorción de Sodio)[1] muy bajo (0,37±0,15), lo cual indica que se trata de lutitas no dispersivas (Faulkner *et al.*,2000).

Desde un punto climático, el área tiene un clima Mediterráneo, con una temperatura media anual de 15° C y una precipitación media anual entorno a los 660 mm, si bien existe una importante variabilidad interanual de las lluvias (Ramos, 2001). El máximo de precipitación se registra durante los meses de otoño. La lluvia es el principal agente erosivo en el área de estudio, donde algunas tormentas de elevada intensidad (>100 mm h^{-1}), en periodos cortos, son habituales en la zona (Ramos y Porta, 1994; Usón, 1998).. Varios estudios realizados en esta zona (Ramos y Porta, 2000; Usón, 1998) han concluido que el valor promedio anual del factor de erosividad de la lluvia (R), que es del orden de 1200 MJ ha^{-1} mm 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. Sin embargo durante los

[1] $SAR=[Na]/([Ca+Mg]/2)^{0.5}$ (Cationes como $mmol_c.L^{-1}$).

años de la última década se han registrado tormentas con un carácter erosivo mucho mayor, llegando a registrase valores de R> 2000 MJ ha^{-1} mm h^{-1}.

En cuanto a los suelos, los dos principales subgrupos de suelos descritos en el área de estudio son los *Calcixerept típic* y los *Xerorthent típic* (Soil Survey Staff, 1999). También son frecuentes los *Haploxerept fluventic*, que presentan endopediones cálcicos, y los *Calcixerept petrocalcic*. Destaca la frecuencia de suelos con mineralogía carbonática, lo cual indica la intensidad de los procesos de calcificación en los suelos del área de estudio. Muchos de estos suelos presentan evidencias de truncamiento de los horizontes superficiales, signo de la ocurrencia de procesos de erosión hídrica. Estas evidencias indican un punto de inflexión en el proceso evolutivo de estos suelos, ligado a la dinámica denudacional. El régimen de humedad de los suelos es xérico y el régimen de temperatura es térmico.

El uso del suelo predominante en el área Alt Penedès – Anoia es el viñedo: 10.220 ha en 2002 (fuente: Mapa de Usos del Suelo de Cataluña año 2002, Institut Cartogràfic de Catalunya). Este cultivo se dedica a la producción de vinos de alta calidad y cavas bajo las normas de regulación de las DO Penedès y Cava, respectivamente. El siguiente cultivo mayoritario son los cereales de invierno (herbáceos de secano) (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, suponen 10.174 ha, 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, usos agrícolas de menor importancia, y suelos con vegetación escasa o nula.

4.3.3. Erosión por cárcavas y barrancos

4.3.3.1. Cartografía de las áreas afectadas a escala regional

A escala regional, la extensión del área afectada por barrancos en el área de estudio fue determinada a partir de fotografías aéreas verticales con solape estereoscópico del año 1993 (escala aproximada 1:30.000, del *Institut Cartogràfic de Catalunya*). El resultado fue georreferenciado en un orto-fotomapa 1:50.000 producido por el mismo instituto.

El análisis del área afectada por la erosión por barrancos se refirió a las unidades de relieve identificadas por Martínez-Casasnovas (1998), que se basó en el sistema de clasificación jerárquica propuesto por Zinck (1988). Estas unidades 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.

La figura 2 y la tabla 1 muestran los resultados del análisis de la afección de la erosión por barrancos a escala regional referida a las unidades de paisaje identificadas en el área de

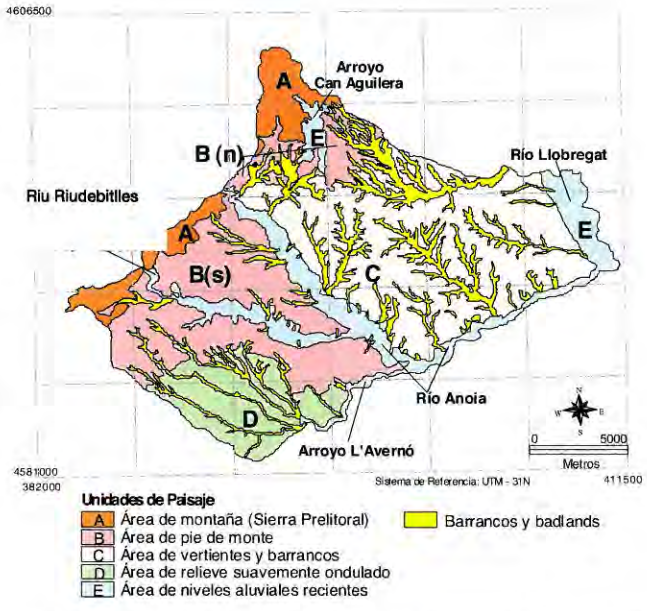


FIGURA 2. Grado de afección de la erosión por barrancos a escala regional en el área del Alt Penedès – Anoia. Los barrancos aparecen delineados sobre las unidades de paisaje del área de estudio obtenidas por Martínez-Casasnovas (1998). (Bn indica zona norte de la unidad de paisaje B, y Bs indica zona sur de la unidad de paisaje B). Fuente: Martínez-Casasnovas, 1998.

estudio por Martínez-Casasnovas (1998). Según estos resultados, la zona norte del Glacis-Piedemonte es la unidad más afectada por la erosión por barrancos, con el 31,9% del área afectada. Este valor puede considerarse como erosión severa o muy severa (Stroosnijder y Eppink, 1993). El volumen erosionado respecto a la superficie de la unidad es de 3 hm^3 km^{-2}. Estas cifras son considerablemente inferiores a las de la zona sur de la unidad, con tasas de 7,8% y 0,8 hm^3 km^{-2} respectivamente. Las diferencias estriban en el control que ejercen los materiales más consolidados de la zona sur de la unidad sobre el desarrollo de los barrancos. No obstante, existen algunos barrancos que conectan las plataformas de conglomerados con los fondos de valle.

TABLA 1. Área afectada y volumen (estimado) por la erosión por barrancos en el área Alt Penedès – Anoia

Unidad de paisaje	Área de la unidad km^2	Área afectada por los barrancos km^2 y (% con respecto al total de la unidad)	Volumen erosionado estimado hm^3 y (profundidad máxima de los barrancos m)
A. Montañas de la Sierra Prelitoral	21,52	0	0
B. - Glacis- Piedemonte			
- Zona norte	17,55	5,60 (31,9%)	52,7 (43)
- Zona sur	66,31	5,19 (7,8%)	52,1 (45)
- Total unidad	83,66	10,79 (12,8%)	104,8
C. Glacis altamente disectado	114,54	27,17 (23,2%)	326,6 (60)
D. Glacis poco disectado	33,51	5,70 (17,0%)	28,7 (30)
E. Valles aluviales	39,82	0,94 (2,3%)	6,2 (45)
Total área de estudio	293,26	44,60 (15,2%)	466,4

La unidad de Glacis altamente disectada, que conecta con la zona norte del Glacis-Piedemonte, está también muy afectada por la erosión por barrancos. Los grandes barrancos ocupan el 23,2% de la unidad, con barrancos de hasta 60 m de profundidad. La unidad presenta la segunda tasa más elevada de volumen erosionado 2,8 $hm^3 km^{-2}$.

Las otras unidades de paisaje presentan niveles de afectación menores. Así, la unidad de Glacis poco disectado presenta un porcentaje de afectación del 17,0 % y un menor volumen erosionado. En esta unidad, los barrancos desarrollados son realmente arroyos que han escavado trincheras en sedimentos recientes de fondo de valle. También son característicos de esta unidad los fondos de valle llanos, que constituyen actualmente las vías de expansión de las cárcavas y barrancos en la unidad. Los valles de los ríos (unidad de paisaje Valles aluviales) también presentan incipientes problemas de erosión por barrancos, que disectan las terrazas de los ríos Riudevitlles y Anoia.

Aunque estos valores son indicativos de la erosión pasada, también debe considerarse como indicativos del riesgo de erosión actual ya que hay evidencias en campo que muestran dicha actividad en las diferentes áreas estudiadas.

4.3.3.2. Tasas de erosión por barrancos a escala detallada

Un análisis llevado a cabo a una escala más detallada ha permitido identificar las tasas de erosión por barrancos en un área modelo la cuenca de la riera Rierussa. Esta riera tiene una cuenca de 25 km^2 y se localiza entre la zona de Gelida - Sant Llorenç d'Hortons y Masquefa (Barcelona). La cabecera de la cuenca seleccionada tiene un área de 0,688 km^2, con un 14,5% de la superficie afectada por barrancos. La pendiente media de esta área, excepto en las paredes de los barrancos, es de 5 – 9°. La profundidad de los barrancos varía entre 20 – 32 m, con una pendiente media de las paredes de 41±14,2° (máximo 78°). El estudio se realizó para los periodos 1975–1995 y 1995-2002, en los que existían fotografías aéreas detalladas del *Institut Cartogràfic de Catalunya* (1:7.000 y 1:5.000 respectivamente), y en concreto se centró en la cabecera de la cuenca de la riera Rierussa. Como condicionantes del proceso se han analizado las características de las lluvias, los cambios de vegetación en las paredes de los barrancos y cambios de uso del suelo en la cuenca de recepción del barranco.

4.3.3.2.1. Características de las lluvias

La precipitación media anual del periodo analizado (1975–1995) fue de 529±160 mm (datos tomados del observatorio de Sant Sadurní d'Anoia, Agencia Estatal de Meteorología). El periodo fue normal-húmedo, con 11 años sobre 20 con lluvias entre 615-659 mm. Se registraron 199 lluvias erosivas (9,3%), siendo la máxima registrada de 95 mm. La intensidad media de las lluvias varió entre 12 y 45 mm h^{-1}.

4.3.3.2.2. Cambio en la cubierta vegetal de las paredes de los barrancos

El análisis de los cambios en el uso del suelo y en la cubierta vegetal dentro del área de recepción de la cabecera de los barrancos se ha basado en el uso de fotografías aéreas detalladas y multitemporales: 1975 (1:7.000), 1995 (1:5.000) y 2002 (1:5.000). Estas fotografías fueron rectificadas para producir ortofotos de escala 1:1.000.

A partir de las fotografías aéreas rectificadas, se caracterizó el uso del suelo y la cubierta de vegetación de los tres años. Primero se realizó trabajo de campo para clasificar el uso del suelo y la vegetación del 2002 (año en que se realizó este estudio), lo que permitió establecer una clave para la fotointerpretación de las fotografías rectificadas de 1975 y 1995. Un ejemplo de clave para la fotointerpretación se muestra en la figura 3. Los principales elementos visibles en las fotografías aéreas consideradas para cartografiar la cubierta vegetal se muestran en la tabla 2.

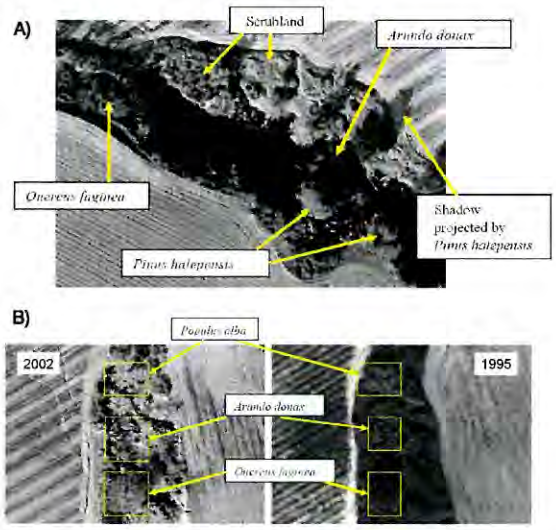


FIGURA 3. A) Clave desarrollada para la fotointerpretación de la vegetación a partir de las fotografías aéreas recientes (año 2002). B) Ejemplo de correspondencia entre la cubierta de vegetación identificada en el campo y apariencia en la fotografía aérea del año 2002 (izquierda) y del año 1995 (derecha). Fuente: Martínez-Casasnovas *et al.*, 2009.

TABLA 2. Elementos de la fotointerpretación utilizados para cartografiar la cubierta vegetal en las paredes de los barrancos

Elementos de fotointerpretación	Uso
Fecha de la fotografía aérea	Ayuda a diferenciar tipos de cubierta vegetal dado que el estado de desarrollo de la vegetación es conocido en diferentes períodos del año. Por ejemplo, es posible distinguir entre especies caducas y perennes (p.e. entre *Populus alba y Pinus halepensis)*. También es útil para diferenciar entre cubiertas con cultivos herbáceos y los matorrales. En la figura 3A puede distinguirse *Quercus faginea, Arundo donax y Populus* alba en invierno (2002). En la figura 3B derecha *Populus alba* aparece sin hojas mientras que en la izquierda (octubre, 1995) se puede distinguir por medio de otros elementos como pueden ser el tono o la textura de la corona textura
Tono	*Pinus halepensis, Populus alba* y *Arundo donax* presentan tonos más brillantes que *Quercus* y que otras las especies presentes en los matorrales. Esto ha permitido distinguir las especies en áreas afectadas por zonas sombreadas (p.e. figura 3A)
Altura de la vegetación	Este elemento es visible mediante el estereoscópio. Es importante diferenciar entre áreas forestales y áreas con matorral. Ha sido muy útil para distinguir tipos de vegetación en 1975, dado que la fotografía aérea presenta una baja resolución
Sombras	Ha sido útil para diferenciar los árboles del matorral, particularmente en 2002, cuando la fotografía fue tomada en invierno. (p.e. diferencias entre las sombras de *Pinus halepensis* y *Quercus faginea*) (figura 3A)
Textura de la corona y formas	Se ha utilizado para distinguir entre especies de árboles. Los pinos presentan una textura y unos tonos muy uniforme, excepto la sección orientada al sol en el momento de la exposición; La corona es irregular, con forma de estrella. *Quercus faginea* presenta una textura más gruesa, con una forma más redondeada y serrada
Localización	A partir de la fotointerpretación de las fotografías de 2002 y el trabajo de campo, ha sido muy útil para conocer el tipo de vegetación en 1975 y 1995

Las clases consideradas en el mapa de usos de territorio fueron viña tradicional, viña mecanizada, cereal de invierno, frutales, matorral, bosque, zonas de transición entre barrancos y campos agrícolas, improductivo, áreas urbanas, infraestructuras y barrancos. Las clases del mapa de cubierta vegetal dentro del barranco se muestran en la tabla 3. Los mapas de usos del territorio y de cubiertas vegetales de cada año se solaparon de dos en dos (1975 y 1995, 1995 y 2002) para producir los mapas de cambios.

TABLA 3. Descripción de las clases de cubierta vegetal consideradas dentro del barranco

Unidad de cubierta vegetal	Descripción
Bosque	Paredes de los barrancos dominadas por *Pinus halepensis* (más del 75 % de cubierta vegetal). Se localiza principalmente en el fondo de los barrancos y en las paredes al norte. Los árboles alcanzan alturas de unos 15 m. Otras especies que aparecen son: *Crataegus monogyna, Daphne gnidium, Olea europaea, Pistacia lentiscus, Quercus ilex* subsp. *ilex, Rosmarinus officinalis, Rubus ulmifolius* y *Ulex parviflorus*
Matorral	Paredes de barranco con dominio de vegetación arbustiva de altura inferior a 7 m. La vegetación cubre más del 75% de la superfície. Aparece en todas las exposiciones, aunque predomina en las orientadas al este y al oeste. Las especies más importantes son *Cistus albidus, Crateagus monogyna, Daphne gnidium, Genista sp., Olea europaea, Pistacia lentiscus, Quercus ilex, Rosmarinus officinalis, Rubus ulmifolius, Thymus vulgaris* y *Ulex parviflorus*
Matorral arbolado	Es similar a la unidad matorral, pero con la presencia de *Arundo donax, Populus nigra, Populus alba* y *Quercus faginea*. La vegetación cubre alrededor del 75% de la superfície. En esta unidad, alrededor del 80% de la cubierta corresponde al matorral y solo un 20% a los árboles. Esta clase está principalmente localizada en las cabeceras de los barrancos, en paredes orientadas al noroeste
Vegetación herbácea	Aparece en las paredes de los barrancos que presentan una cobertura entre 50-75%, dependiendo del período del año. Se localiza principalmente en las paredes orientadas al sur o al oeste. Las especies presentes son: *Genista* sp., *Rosmarinus officinalis, Thymus vulgaris* and *Ulex parviflorus*
Paredes no vegetales	Similar a la unidad de vegetación herbácea, pero con una cobertura menor del 25% y principalmente localizada en las paredes orientadas al sur
No descrita	Áreas sin descripción porque se encuentran en zonas de las fotografías muy sombreadas, o porque presentan una difícil interpretación

La tabla 4 muestra la superficie ocupada por cada una de las clases de cobertura descritas en la tabla 3 en cada uno de los años analizados. El análisis de los resultados reveló que las principales clases de cubierta vegetal en los barrancos son el matorral, la cubierta forestal y la no vegetada, que representaban un 38,5%, un 30,1 y un 23,8%, respectivamente. La cubierta vegetal es dinámica en el tiempo y presenta importantes cambios, en particular las clases forestal y matorral. En el periodo 1975-1995 hubo una importante disminución de la cubierta de matorral (20,8%) y un incremento de la forestal (21,5%). Además, hubo una ligera reducción de la clase no vegetada en las paredes de los barrancos (4%). En el periodo 1995-2002 se observó la misma tendencia, aunque con diferentes ratios; así el matorral disminuyó en un 4,3% mientras el forestal se incrementó en un 5,8% y las paredes no vegetadas un 1,6%.

TABLA 4. Área y porcentaje de las clases de cubierta vegetal en el área de barrancos estudiada durante los periodos 1975-1995 y 1995-2002

Clase de cubierta vegetal	Área y porcentaje con respecto al total del área del barranco					
	1975		1995		2002	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Bosque	1,46	14,7	3,37	36,2	3,84	42,0
Matorral	5,31	53,7	3,07	33,0	2,62	28,7
Matorral arbolado	0,45	4,6	0,57	6,1	0,65	7,1
Vegetación herbácea	0	0	0	0	0,07	0,8
Paredes no vegetadas	2,66	27,0	2,14	23,0	1,96	21,4
No descrita	0	0	0,16	1,7	0	0
Total	9,88	100,0	9,32	100,0	9,14	100,0

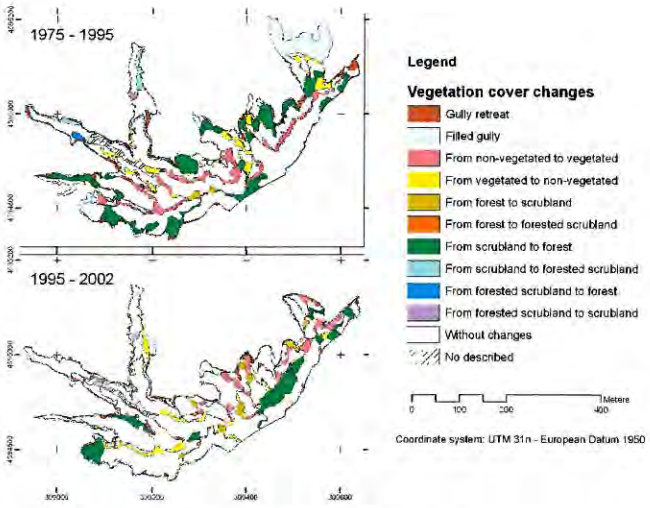


FIGURA 4. Cambio de la cubierta vegetal durante los periodos 1975-1995 y 1995-2002 en la cabecera de la riera Rierussa. Fuente: Martínez-Casasnovas *et al.*, 2009.

Un análisis más detallado de los cambios (tabla 5 y figura 4) muestra algunas transferencias relevantes entre las clases de vegetación descritas. En el primer periodo (1975-1995) uno de los principales cambios fue el incremento de la cubierta vegetal en las paredes no vegetadas de los barrancos, que representaban un 9,7% del área. Esta área es mayor que el área en el cual hubo una disminución de la cubierta vegetal (5,6% del área). La clase que mostró un mayor incremento fue la forestal, que pasó desde las áreas de matorral (15,5%) y las áreas no vegetadas (5,1%). Además, hubo pequeñas áreas (1,5%) que pasaron de matorral a matorral forestado. De este análisis resulta claro que, durante el primer periodo, hubo un balance positivo de la cubierta vegetal en las áreas de barrancos, con un importante incremento de la superficie forestal (20,0%). El segundo periodo (1995-2002) continuó con la evolución experimentada durante el primero. La principal contribución para el incremento vegetal fue el paso de paredes no vegetadas a paredes con matorral. El área forestal también experimentó un incremento desde el 36,8%, en 1995, al 42,6%, en 2002, principalmente debido al cambio desde matorral y matorral forestado.

TABLA 5. Cambios en la cubierta vegetal en el área de barrancos estudiada durante los periodos 1975-1995 y 1995-2002

Cambios de vegetación	1975-1995		1995-2002	
	ha	ha año^{-1}	ha	ha año^{-1}
Erosión en barrancos	0,47	0,02	0,25	0,04
Relleno de barrancos	1,05	0,05	0,42	0,07
De paredes no vegetadas a vegetadas	0,86	0,04	0,58	0,09
De paredes vegetadas a no vegetadas	0,49	0,02	0,44	0,07
De forestal a matorral	0,05	0	0,27	0,04
De forestal a matorral forestado	0	0	0,01	0
De matorral a forestal	1,37	0,07	0,83	0,13
De matorral a matorral forestado	0,13	0,01	0,03	0,01
De matorral forestado a forestado	0,03	0	0,01	0
De matorral forestado a matorral	0,03	0	0,01	0

4.3.3.2.3. Tasas de erosión por barrancos: retroceso y producción de sedimentos

Para el cálculo de la tasa de retroceso de las paredes de los barrancos se llevó a cabo, para cada fecha, la delineación del perímetro de los barrancos. El resultado fue restituido mediante técnicas fotogramétricas. La escala de restitución fue 1:1.000. Los errores de posicionamiento de los límites de los barrancos generados en el proceso de restitución fueron de ±0,015 m en XY y de ±0,07 m en Z. Estos errores están dentro de la tolerancia admitida para producir una cartografía 1:1.000 (±0,20 m en XY y ±0,30 m en Z).

Las tasas de producción de sedimentos fueron calculadas a partir de una metodología introducida por Martínez-Casasnovas (1998, 2003), basada en la sustracción de modelos digitales de elevaciones (MDE) de diferentes fechas en formato de malla regular (raster). Estos MDE para los años 1975 y 1995 se construyeron a partir de las curvas de nivel (intervalo 1 m), cotas, líneas de ruptura de pendiente y líneas de suelo generadas a partir de la restitución fotogramétrica de los pares estereoscópicos de ambas fechas. La malla regular de cotas, con

una resolución planimétrica de 1 m y altimétrica de 0,01 m, se generó a partir de una triangulación (TIN) y posterior interpolación a raster utilizando la herramienta 3D Analyst del SIG ArcView 3.2 (ESRI). Posteriormente, se procedió a la sustracción de los MDE (1995–1975), lo que permitió obtener una nueva malla de datos con las diferencias de altitud en cada punto de la malla de 1 x 1 m. A partir de aquí se establecieron las zonas con erosión y sedimentación ocurrida en los barrancos. Siguiendo el criterio de DeRose *et al.* (1998), la fiabilidad de la estimación en el cálculo de las diferencias se estableció en el 95% del intervalo de confianza (X±2SD), donde X es la media de las diferencias en las áreas de control establecidas para la calibración de los modelos y SD es la desviación estándar de las diferentes medias de las áreas de control. No todos los sedimentos producidos por la erosión en los barrancos son exportados fuera de la cuenca. Parte se deposita dentro del área de barrancos. Para el cálculo de la tasa de sedimentación se consideró una densidad aparente de 1,40±0,10 Mg m^{-3}, calculada a partir de 5 muestras de sedimentos adquiridas mediante cilindros en la parte baja de las paredes y en la zona del cauce de los barrancos. Por diferencia entre la tasa de erosión y sedimentación se obtuvo la tasa neta de erosión en los barrancos. Mayor detalle de la metodología aplicada se puede encontrar en Martínez – Casasnovas *et al.*, 2004.

La tabla 6 muestra la extensión de las áreas afectadas por barrancos en la cabecera de la riera Rierussa, como resultado de la tabulación cruzada entre las coberturas con los límites de los barrancos, en el periodo de estudio 1975-1995. La figura 5 muestra el resultado de la superposición de los límites del sistema de barrancos en las fechas consideradas, así como las áreas de retroceso y relleno.

TABLA 6. Matriz de contingencia de las áreas erosionadas en 1975 y 1995 en la cabecera de la riera Rierussa

	Año 1975 (ha)		
Año 1995 (ha)	**Áreas afectadas por barrancos**	**Áreas no afectadas**	**Total (año 1995)**
Áreas afectadas por barrancos	9,58	0,46 [1]	10,04
Áreas no afectadas	1,06[2]	57,78	58,84
Total (año 1975)	10,64	58,24	68,88

[1] Área erosionada en el periodo 1975 - 1995; [2] Área de barrancos rellenada en el periodo 1975 - 1995.

De los resultados mostrados en la figura 5 se deduce que el área afectada por los barrancos fue de 10,64, en 1975, y 10,04 ha, en 1995; lo cual puede parecer erróneo en una primera interpretación. Esta aparente disminución del área afectada es debida al relleno de algunas partes de los barrancos para la creación de nuevas plantaciones de viña (práctica común en el área de estudio). El área erosionada entre 1975 y 1995 fue de 0,46 ha (de las 68,8 ha de la cuenca), es decir el 0,7% de la cuenca. Esto representa una tasa anual de erosión de 0,023 ha $año^{-1}$ o una tasa de retroceso lineal de 0,08 m $año^{-1}$. Estas tasas son tasas por defecto, ya que las áreas erosionadas y rellenadas en el periodo no han podido ser evaluadas. No obstante, son similares a las encontradas por otros investigadores (Vandekerckhove *et al.*, 2001). El retroceso no es uniforme a lo largo del perímetro. La erosión en las paredes laterales

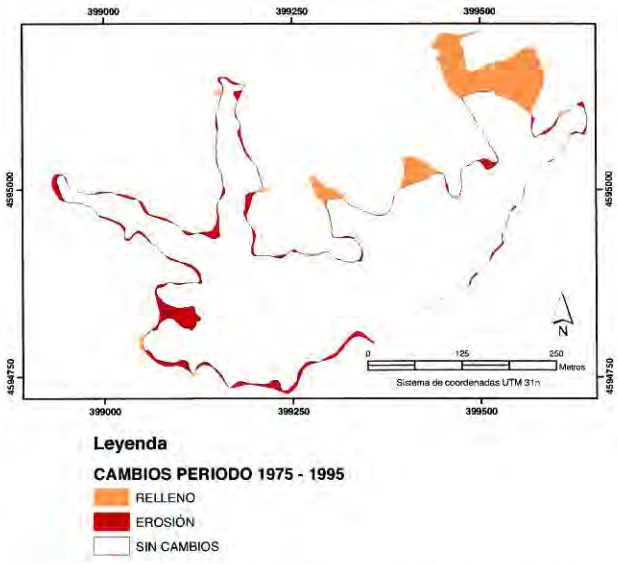


FIGURA 5. Retroceso y relleno de los barrancos de la cabecera de la riera Rierussa en el periodo 1975 – 1995.

parece más importante que el retroceso de la cabecera, aunque esto puede estar enmascarado por algunas medidas de conservación que se aplican para evitar la erosión remontante.

La tabla 7 resume los datos de erosión y sedimentación durante el periodo 1975 – 1995 en los barrancos de la cabecera del sistema de la riera Rierussa. De ella se deduce que el 51,5% del área ocupada por los barrancos sufrió algún tipo de erosión durante dicho periodo, mientras que en el 29,1% del área se produjo deposición de materiales. La figura 6 muestra las diferencias de elevación de los años 1975 y 1995 a partir de las cuales se ha realizado el análisis de las tasas de producción de sedimentos. El total de volumen de materiales desplazado durante el periodo fue de 94.423±4.498 m^3 (169.961±8.097 Mg), con una tasa de producción de sedimentos (SPR) de 846±40 Mg ha^{-1} $año^{-1}$. Parte de este volumen desplazado fue depositado dentro del área estudiada (41,0% de los materiales): 38.711±2.545 m^3 (54.196±3.563 Mg), lo cual supone una tasa de sedimentación media (SDpR) de 270±18 Mg ha^{-1} $año^{-1}$. La tasa de erosión neta (NE), calculada como SPR - SDpR, fue de 576±58 Mg ha^{-1} $año^{-1}$, con una tasa de exportación de sedimentos (SDRg) del 68,1%.

TABLA 7. Tasas de erosión y deposición en el área afectada por barrancos en la cabecera de la riera Rierussa en el periodo 1975 – 1995

	Área afectada (m^2)	Diferencia de altitud media (m)	Volumen total (m^3)	Masa total estimada (Mg)	Tasa media anual (Mg ha^{-1} $año^{-1}$)
Erosión	50.888	-1,86	94.423±4.498	169.961±8.097	SPR 846±40
Estable	19.152	-0,007	130±1.693	234±3.047	1,2±15
Deposición	28.788	1,34	38.711±2.545	54.196±3.563	SDpR 270±18

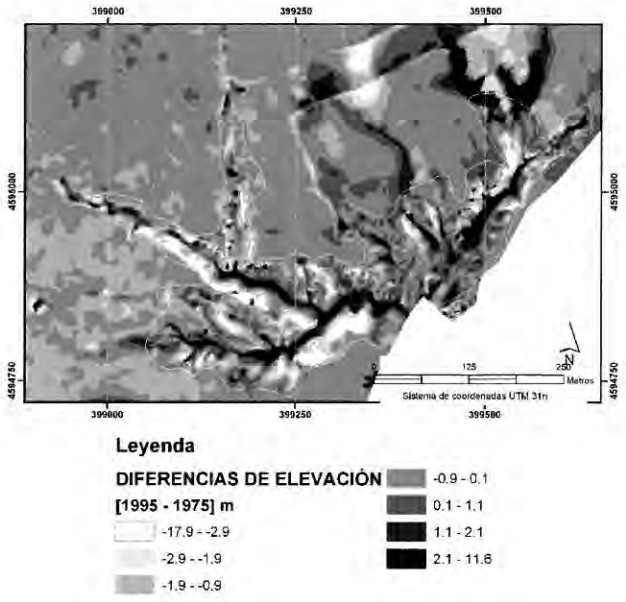


FIGURA 6. Diferencias de elevación calculadas a partir de los modelos digitales de elevación detallados (1m de resolución) obtenidos por restitución fotogramétrica de fotografías aéreas de las fechas 1975 y 1995.

Los patrones de erosión y sedimentación no fueron uniformes a lo largo del área de estudio. La erosión se produjo principalmente en las paredes laterales casi verticales, caracterizadas por la ausencia de vegetación. Así, los movimientos en masa, que preferentemente ocurren en las paredes orientadas al N o NE, vendrían a suponer hasta el 46,9% de la producción total de sedimentos dentro del barranco. Los sedimentos que se depositan lo hacen preferentemente en la parte media y terminal de los cauces. Suponen hasta el 31,9% de los sedimentos generados lo cual, si se compara con los resultados de otras investigaciones, 2,2 – 15,8% (DeRose *et al.*, 1998), puede dar la impresión de una cierta estabilización de los cauces.

Con respecto a las tasas de erosión obtenidas en otras zonas de estudio, existe una diferencia de un orden de magnitud menor en relación a la obtenida en el Alt Penedès – Anoia (Bufalo y Nahon, 1992; Martínez-Casasnovas y Poch, 1998). Tal diferencia es atribuible al método de cálculo de la erosión. Mientras otros métodos sólo incluyen los procesos de

generación de sedimentos por flujo superficial, el propuesto incluye también la incisión de los cauces, los movimientos en masa, la erosión lateral de los cauces y la erosión remontante.

La tabla 4 muestra los resultados de la comparación entre los periodos 1975-1995 y 1995-2002 en cuanto a la extensión del área ocupada por los barrancos. La superficie ocupada por barrancos parece disminuir con el tiempo: de 9,9 ha en 1975 a 9,14 en 2002. Sin embargo, esta reducción aparente del área erosionada es debida a rellenos efectuados por los mismos agricultores al plantar nuevas viñas. Ésta es una práctica frecuente en la región desde la década de 1980 (Martínez-Casasnovas, 2003). Las principales razones para estos rellenos son la reparación de los rasgos de erosión, la reparación de las infraestructuras en los campos y la pretensión de dar mayores dimensiones y menor pendiente a las nuevas plantaciones, lo cual facilita su mecanización. En el periodo 1975-1995 esta práctica representó 1,09 ha (10,4% del área ocupada por los barrancos en 1975), a una ratio de 0,054 ha año^{-1}. En el segundo periodo la ratio fue mayor, 0,073 ha año^{-1}.

A pesar del relleno de los barrancos y del control de sus bordes por parte de los agricultores, los resultados confirman que la erosión por barrancos es un proceso activo en el área de estudio. La tabla 8 también muestra que el retroceso de los barrancos ha representado una pérdida de 0,50 ha (0,83% de la cabecera estudiada). Esto representa una tasa de 0,025 ha año^{-1}. Estos ritmos son por defecto, ya que las áreas erosionadas y rellenas no se pueden detectar a partir del análisis de las fotografías aéreas. En el segundo periodo, aunque más corto, la tasa de retroceso fue un 60% mayor (0,04 ha año^{-1}), con un área total afectada de 0,25 ha.

Los procesos de erosión por barrancos (actualmente activos) dieron lugar, en las fechas analizadas, a una tasa media anual de generación de sedimentos (en el área modelo de Masquefa) de 846±40 Mg ha^{-1} año^{-1}, y a una tasa media de erosión neta de 576±58 Mg ha^{-1} año^{-1}. Esto supone una tasa de exportación de sedimentos del 68%, que representa 2,78 veces la erosión producida por eventos extremos de precipitación en parcelas de viña; lo cual da una idea de la importancia de los procesos de erosión por barrancos en la generación de sedimentos en el área de estudio.

TABLA 8. Retroceso y relleno de los barrancos en el sistema piloto estudiado: periodos 1975-1995 y 1995-2002

	1975-1995			1995-2002		
	ha	%	ha año^{-1}	ha	%	ha año^{-1}
Retroceso de los barrancos	0,50	4,76	0,025	0,25	2,59	0,040
Barranco rellenado	1,09	10,37	0,054	0,46	4,76	0,073
Barranco (sin cambios)	8,92	84,87		8,95	92,65	

4.3.3.2.4. Usos del suelo en las parcelas agrícolas de las cabeceras de los barrancos y estimación de la erosión

Otro de los aspectos analizados en la zona de estudio, a escala detallada, son las pérdidas de suelo en los campos agrícolas de las cabeceras de los barrancos en función de los usos del suelo en diferentes años. Se hizo un análisis de los cambios de uso de las tierras entre el período 1975 y 2002 (figura 7), observándose un claro cambio en el tipo de cultivo de la viña, que pasó de las típicas parcelas tradicionales de viña, con medidas de conservación, a parcelas preparadas para realizar el máximo de labores de manera mecanizada, sin medidas de conservación y con suelo desnudo. Por otra parte, las superficies dedicadas a un uso forestal mostraron un aumento significativo entre 1975 y 2002 (tabla 9).

Para estimar las pérdidas de suelo se utilizó la ecuación de pérdida de suelos universal revisada (RUSLE; Renard *et al.*, 1991). Los valores de los diferentes factores de la ecuación se establecieron en función de los resultados que habían sido obtenidos en la zona en estudios previos.

Para el factor R, se consideró un valor medio de 1120 MJ $ha^{-1}h^{-1}año^{-1}$ (Martínez-Casasnovas *et al.*, 2002).

El valor del factor suelo (K), para el año 1975, fue estimado a partir de datos recogidos por Boixadera (1983) en campos del área de estudio. Se obtuvieron valores entre 0,06 y 0,07. Para el año 2002, después de la transformación efectuada, los valores de K se obtuvieron a partir de muestras recogidas en las mismas. En este caso se obtuvieron valores entre 0,075 (campos poco nivelados) y 0,077 (campos muy nivelados).

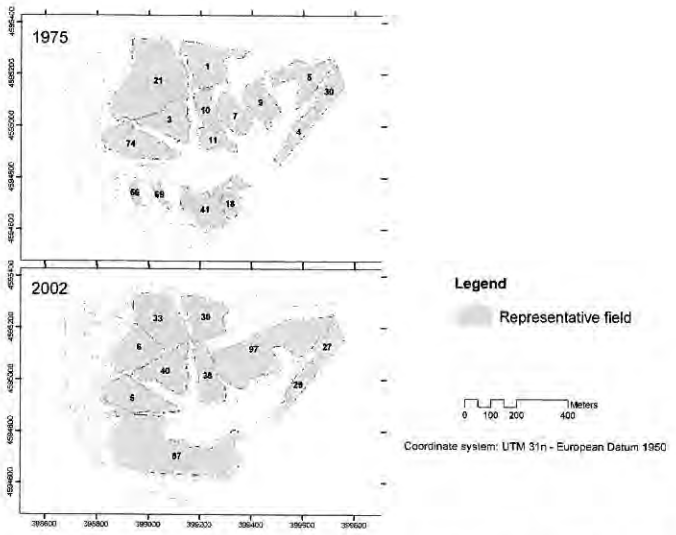


FIGURA 7. Organización de la cabecera de los barrancos en el área de estudio en 1975 y 2002 (ver las características en la tabla 10). Fuente: Martínez-Casasnovas *et al.*, 2009.

El factor topográfico (LS) se determinó a partir de los modelos digitales del terreno, con ayuda de USLE2d (Van Oost *et al.*, 2000).

El factor cultivo (C) se determinó en cada zona considerando sus diferentes usos: viña tradicional, 0,797; viña mecanizada, 0,743; cereales de invierno, 0,580; frutales, 0,736; improductivo, 0,310; forestal, 0,117 y matorral, 0,117.

TABLA 9. Cambios en la cubierta vegetal en la cuenca de la cabecera de la riera Rierussa: años 1975, 1995 y 2002

Clases de cubierta vegetal	1975		1995		2002	
	ha	%	ha	%	ha	%
Viña tradicional	14,7	24,5	9,7	16,1	7,40	12,3
Viña mecanizada	0,0	0,0	11,4	18,9	11,38	18,9
Cereales de invierno	18,8	31,2	0,0	0,0	2,35	3,9
Áreas urbanas	0,1	0,2	1,6	2,7	1,63	2,7
Infraestructuras	1,1	1,8	1,7	2,9	1,75	2,9
Matorral	9,0	15,0	5,9	9,8	5,90	9,8
Inproductivo	1,4	2,3	3,9	6,5	3,55	5,9
Forestal	2,8	4,6	14,0	23,3	14,27	23,7
Frutales	1,0	1,6	1,6	2,6	1,57	2,6
Transición cultivo-barrancos	1,4	2,4	1,1	1,8	1,26	2,1
Barrancos	9,9	16,4	9,3	15,5	9,14	15,2

El factor de prácticas de conservación fue asignado en función de los criterios propuestos por Wischmeier y Smith (1978). La existencia de prácticas de conservación se observaron a partir de las fotografías aéreas: terrazas, cultivos a favor, oblicuos o perpendiculares a las líneas de máxima pendiente (tabla 10).

La pérdida de suelos fue del orden del 26,5% mayor en 2002 que en 1975, lo que indica que los movimientos de suelo efectuados para sistematizar y nivelar las parcelas no sirvieron para reducir la pérdida de suelo, ya que el incremento de la erosión fue principalmente consecuencia del cambio de uso del suelo y de los cambios en las prácticas de conservación.

A escala de parcela, las pérdidas estimadas de suelo, debidas a los cambios de uso, se muestran en la tabla 10. En la parcela con ID 5, aunque la pendiente no cambió significativamente, la pérdida del suelo se incremento de 11,5 a 38,4 Mg ha^{-1} $año^{-1}$ debido a la eliminación de terrazas. En las parcelas con ID 6 y 33, donde las pendientes se mantuvieron o

se redujeron, el incremento de la pérdida del suelo se puede atribuir al cambio de uso que pasó de cereal de invierno a viña mecanizada.

TABLA 10. Pérdida de suelo estimada en parcelas representativas de la cuenca de la cabecera de la riera Rierussa

Características de las parcelas (año 2002)					Características de las parcelas (año 1975)				
ID Parcela	Uso del suelo	Pendiente (°)	Prácticas de conservación	Pérdida de suelo (Mg ha^{-1} $año^{-1}$)	ID Parcela	Uso del suelo	Pendiente (°)	Prácticas de conservación	Pérdida de suelo (Mg ha^{-1} $año^{-1}$)
5	C	4.7	a nivel ⊥max P	38,4	74	TV	4.9	Terrazas ⊥max P	11,5
6	MV	6.6	a nivel ⊥max P	109,5	21	C	6.5	a nivel ⊥max P	61,0
33	MV	5.6	a nivel /max P	108,0					
27	U	8.4	-	44,6	30	U	6.4	-	46,3
29	MV	4.4	a nivel ⊥max P	45,9	4	TV	3.3	a nivel =max P	38,6
30	U	9.6	a nivel ⊥max P	91,6	1	C	9.5	a nivel ⊥max P	100,7
38	MV	6.1	a nivel =max P	124,6	10	TV	6.3	a nivel ⊥max P	55,4
					11	TV	7.0	a nivel ⊥max P	67,2
40	MV	6.1	a nivel ⊥max P	87,0	3	C	6.0	a nivel /max P	67,9
97	MV	6.6	a nivel ⊥max P	81,4	5	C	7.5	a nivel /max P	85,1
					7	TV	7.3	a nivel /max P	116,3
					9	TV	6.6	a nivel ⊥max P	117,2
87	U	6.9	-	75,9	41	C	5.2	a nivel /max P	48,8
					18	O	5.1	a nivel =max P	91,1
					56	U	6.5	-	25.4
					69	TV	6.2	a nivel ⊥max P	24.9

Leyenda: C (cereales de invierno), MV (Viña mecanizada), TV (Viña tradicional), O (Frutales), U (Improductivo); máx. P (máxima pendiente (grados)), ⊥ (perpendicular), / (oblicuo), = (paralela)

El cambio de viña tradicional a viña mecanizada también produjo un incremento de pérdidas de suelo debido a la eliminación de prácticas de conservación. Este fue el caso de la parcela con ID 38 en 2002 (que provenía de la transformación de las parcelas 10 y 11, en 1975). En este caso, la pérdida de suelos se incrementó desde 55,4 - 67,2 a 124,6 Mg ha^{-1} $año^{-1}$, aunque la pendiente se redujo de media desde 6,3-7,0 a 6,1%. En las parcelas que sufrieron mayor grado de nivelación, ID 7 y 9, la reducción de las pérdidas de suelo se debió a que la pendiente media disminuyó después del nivelado desde 6,6 / 7,7 a 6,6% y a la aplicación de mejoras en la protección de los suelos.

4.3.4. Erosión en parcelas de viña

4.3.4.1. Pérdidas de suelo y nutrientes

Del análisis de los estudios presentados en el apartado anterior, que incluye las parcelas circundantes a los barrancos, se puede tener una primera idea de los problemas de erosión que presentan las parcelas de viña. Estos problemas se ven incrementados en las nuevas parcelas que han sido niveladas y preparadas para que todas las labores se realicen de manera mecanizada, habiéndose eliminado las medidas de conservación de suelos. A fin de confirmar las estimaciones, se llevaron a cabo evaluaciones en campo que permitieron conocer, no sólo las pérdidas de suelo que se originan, sino también las pérdidas de nutrientes y el coste económico que todo ello supone.

El estudio se llevó a cabo en una parcela piloto de 2,12 ha (figura 8), situada en la misma cuenca de estudio y en las inmediaciones del barranco. Dicha parcela es representativa de estos nuevos viñedos. La parcela fue nivelada, antes de la plantación, con cortes del perfil de hasta 3m de altura en la parte alta de la pendiente y relleno en la parte baja, en la conexión con el barranco. La pendiente media resultante de la parcela era de 8,9%. El marco de plantación era de 1,3 x 3,1 m, con una disposición de las líneas principales perpendicular a la

línea de máxima pendiente. La parcela incluía tres variedades de uva: Macabeo, Chardonnay y Parellada.

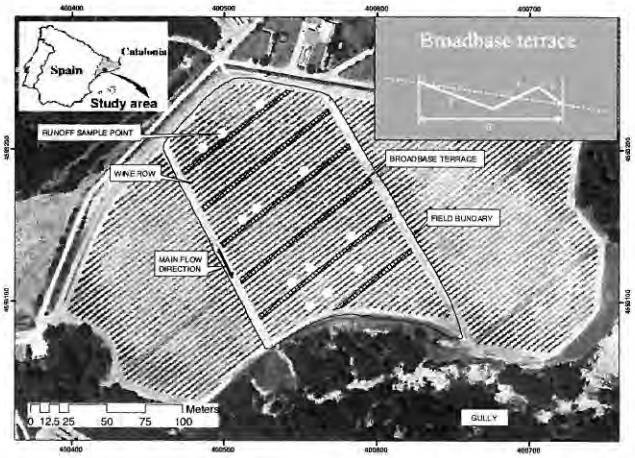


FIGURA 8. Localización del área de estudio para la estimación del coste de la erosión. Fuente: Martínez-Casasnovas y Ramos, 2006.

Como medidas de conservación la parcela disponía de unas terrazas desagüe, denominadas localmente *rasas*, que permiten interceptar la escorrentía superficial y conducirla fuera de la parcela mediante canales de desagüe. Parte de los sedimentos depositados en estas *rasas* son posteriormente redistribuidos con la ayuda de la maquinaria de la misma explotación, rellenando los pequeños regueros y cárcavas que se van formando a causa de la lluvia. Los suelos se clasifican como *Xerorthent típic* (Soil Survey Staff, 1999).

Debido a los trabajos de nivelación, se habían creado diferencias en la profundidad del suelo y en otras características de los suelos, como la materia orgánica, la conductividad hidráulica, la susceptibilidad al sellado, la capacidad de retención de agua y la infiltración base, lo que había generado diferencias dentro de la misma parcela, en el contenido de humedad y en la generación de escorrentía después de las lluvias. Por ello, y para poder tener una mejor estimación de lo que ocurría en diferentes partes de la parcela, se instalaron, distribuidos por la misma, 12 colectores "tipo *Gerlach*", de 50 cm de ancho.

La escorrentía total se modelizó utilizando un modelo SVAT (soil-vegetation-atmophere-transfer model), que incluye la modelización de la interceptación, infiltración, drenaje, evaporación del suelo, evaporación del cultivo y escorrentía. Como parámetros de entrada al modelo, además de las características texturales, se tuvieron en cuenta propiedades hidrológicas evaluadas en campo tales como: conductividad hidráulica, velocidad de infiltración base, capacidad de retención de agua y susceptibilidad al sellado. La escorrentía generada en cada evento erosivo se relacionó con los volúmenes y muestras registrados en los colectores tras los eventos más importantes durante el periodo de estudio. Se observó un buen ajuste entre la escorrentía registrada y modelada. Para cada muestra recogida en los eventos que generaron escorrentía se analizó la concentración de nutrientes (N y P totales) en los sedimentos atrapados por los colectores Gerlach. A partir de esta información se calculó la pérdida de suelo y nutrientes de toda la parcela.

Las evaluaciones se llevaron a cabo para distintos años, con diferentes características. Como ejemplo, en la tabla 11 se muestran los resultados para eventos de lluvia registrados en el año 2003; año con una lluvia próxima a los 640 mm y con una distribución típica en el área mediterránea, concentrada principalmente en primavera y otoño. La mayoría de la lluvia registrada en invierno y en primavera fue de baja intensidad, por lo que la escorrentía durante estas estaciones fue escasa. Sin embargo, en otoño, la escorrentía fue relativamente alta; el total de suelo perdido por escorrentía se estimó en 19,5 Mg ha^{-1}. El total de N y P perdidos, procedente de la fertilización orgánica y mineral, fue de 14,9 kg ha^{-1} y 11,5 kg ha^{-1}, respectivamente, lo que representa un 6 y un 26,1% de las aplicaciones anuales. Aunque el porcentaje de P perdido puede parecer demasiado alto, hay que tener en cuenta que el P es principalmente adsorbido en los horizontes superficiales, que son los más directamente afectados por la escorrentía; además, el contenido de P en estas capas era relativamente elevado puesto que se habían hecho aplicaciones de materia orgánica en superficie.

TABLA 11. Lluvia, escorrentía, sedimentos y nutrientes (N y P) movilizados por escorrentía durante el año 2003

Periodo	Lluvia mm	Escorrentía L m^{-2}	Pérdida de suelo Mg ha^{-1}	Pérdida de N kg ha^{-1}	Pérdida de P kg ha^{-1}
1/1-20/1	11,2	1	0,06	0,04	0,05
20/1-5/3	124,6	13	0,39	0,28	0,17
5/3-4/3	10,2	0,5	0,64	0,06	0,04
3 /4-26/05	126	21	3,46	4,84	2,92
26/5-16/9	24,8	9,4	7,77	3,89	4,93
16/9-3/11	222	34,6	5,42	4,87	2,59
Total	647,4	98,5	19,98	14,9	11,5

Esta pérdida de nutrientes se ha comparado con la pérdida ocasionada por el evento de lluvia extrema registrado el 10 de junio de 2000 (215 mm, de los cuales 205 mm cayeron en 2 horas y 15 minutos, con una intensidad máxima en 30 minutos de 170 mm) (Ramos y Martínez-Casasnovas, 2004). La cantidad de N perdido en el año 2003 fue mucho menor (14,9 kg ha^{-1}, en 2003, frente a los 108,5 kg ha^{-1} en el evento extremo de 2000). Lo mismo se observa con el P perdido (11,5 kg ha^{-1}, en 2003, frente los 108,6 kg ha^{-1} en el evento extremo de 2000). Sin embargo, la proporción de esos nutrientes con respecto a la pérdida neta de suelo fue mayor en 2003. Estas diferencias se deben a las características de la lluvia extrema y a la relativa importancia de los diferentes procesos de erosión que se ocasionaron en el campo. El proceso dominante en el evento extremo de 2000 fue la escorrentía concentrada, que supuso el 58% del total de suelo perdido (Martínez-Casasnovas *et al.*, 2002). En este caso, la mayoría del sedimento movilizado tuvo lugar por medio de cárcavas incipientes (0,4-0,5 m de profundidad), donde la concentración de N y P es mucho menor que en la parte más superficial del suelo que, por el contrario, resulta más afectada por los fenómenos de lluvia más habituales.

4.3.4.2. Valoración económica de los costes de la erosión en parcelas de viña

Dejando aparte el coste ambiental que suponen los procesos de erosión, siempre difíciles de cuantificar, y de sus implicaciones en la reducción o eliminación de los horizontes superficiales, en la pérdida de la capacidad de retención hídrica del suelo y en la pérdida de superficie cultivable, hay otros aspectos, tales como la pérdida de nutrientes o el propio trabajo de reparación de las parcelas que si puede estimarse. En este sentido se llevó a cabo una valoración económica de los costes de la erosión en base a la pérdida de nutrientes en parcelas de viña, al mantenimiento de las *rasas* y a la restauración de los surcos y cárcavas incipientes, con la redistribución de los sedimentos del suelo movilizado por la erosión o el aporte de suelo transportado de otras zonas. Se estimó el porcentaje que suponían dichos costes en relación al valor de la uva producida.

Para estimar los costes debidos a la pérdida de nutrientes, se tuvo en cuenta la fertilización aplicada anualmente en la viña, consistente en 500 kg ha^{-1} de fertilizante de composición 4N-6P-2MgO-1Fe-40S, cuyo coste era de 0,21 kg^{-1}. Además, se consideró que cada 4 años se aplicaba una dosis de 40 Mg ha^{-1} de compost de bovino, incorporado en los primeros centímetros del suelo. El precio pagado por el agricultor fue de 0,02 kg^{-1}.

Teniendo en cuenta los resultados del apartado anterior, se estimaron unos costes de 79,5 € ha^{-1} debido a las pérdidas de N y de, aproximadamente, 40 € ha^{-1}, debido a las pérdidas de P. Teniendo en cuenta el precio de la uva en el año de estudio, dichas pérdidas suponían, respectivamente, el 2,4 y 1,2 % de los ingresos (tabla 12).

Por otra parte, como se ha comentado previamente, los agricultores redistribuyen parte de los sedimentos movilizados por las lluvias. Estos sedimentos proceden de los regueros y las cárcavas incipientes y se acumulan en las *rasas* y en las cunetas que rodean las parcelas, que actúan como trampas antes que los sedimentos alcancen el sistema de drenaje general. La redistribución de estos sedimentos incluye costes en términos de mano de obra y maquinaria

que, para este estudio, se evaluaron a partir de una encuesta efectuada al agricultor. Estas operaciones de mantenimiento suponen, por término medio, 7,5 horas ha^{-1} $año^{-1}$. Según la información suministrada por los agricultores de la zona, el coste de mantenimiento de las *rasas* de drenaje, de la redistribución de los sedimentos y del relleno de los regueros y cárcavas incipientes suponía un coste medio de 180 € ha^{-1} $año^{-1}$, lo que significaba un 5,4% de los ingresos por la venta de la uva (según datos referentes al año 2003).

TABLA 12. Costes de mantenimiento y por pérdida de nutrientes (referidos al año 2003) en una parcela de viña

Concepto		Costes		
			% de los ingresos	(€ ha^{-1})
Mantenimiento		7,5 h ha^{-1} $año^{-1}$	180 € ha^{-1} $año^{-1}$	5%	165
Pérdida nutrientes	N		14,9 kg ha^{-1} $año^{-1}$	2,4%	79,5
	P		11,5 kg ha^{-1} $año^{-1}$	1,2%	39,8

Este coste no debería ser eludido por los agricultores. En el caso de las *rasas*, Martínez-Casasnovas *et al.* (2002) mostraron que, aunque su principal función es interceptar la escorrentía superficial y transportarla fuera de los campos, también actúan como trampas para los sedimentos. Por tanto, si esas terrazas desaparecieran los sedimentos podrían ser transportados fuera de las parcelas, lo que supondría un incremento de la pérdida de suelo de un 31,5% sobre las tasas descritas anteriormente. Esto sería debido a que la falta de sedimentos impediría emprender la restauración de los regueros y cárcavas incipientes, que pasarían a crecer a mayor velocidad y a producir cambios significativos en la topografía local a medio y largo plazo.

4.3.5. Conclusiones

Este capítulo ha puesto de manifiesto la importancia de los procesos de erosión en una extensa zona vitícola de la DO Penedès, destacando la magnitud de los procesos de erosión por cárcavas y barrancos, habitualmente menos estudiados que los procesos de erosión laminar o por surcos. La investigación se ha basado en evaluaciones de campo y en el uso de tecnologías de la información geográfica (sistemas de información geográfica y teledetección), contribuyendo al desarrollando de métodos para la cuantificación de la erosión como el análisis multitemporal de modelos digitales de elevación. Estos métodos, en comparación con otras técnicas o modelos existentes de medida o estimación de la erosión en cárcavas y barrancos, integran la erosión causada por diversos tipos de procesos: flujo superficial, movimientos en masa, erosión de paredes laterales por los cauces, retroceso de las cabeceras de las cárcavas o barrancos o incisión de los cauces.

En el área de estudio, la cartografía de la erosión por barrancos a escala regional, ha puesto de manifiesto que el 15,2% de la superficie ha sido afectada por la erosión por barrancos. Existen unidades de paisaje donde la disección alcanza el 31,9% del área (zona norte del Glacis-Piedemonte) o unidades donde la disección es muy baja (2,3% en la zona de relieves aluviales recientes). Las diferencias estriban en el control que ejercen los materiales subyacentes y en el potencial para la erosión en cada zona (diferencia de elevación con respecto al nivel de base). Los procesos de erosión por barrancos están actualmente activos, con tasas medias anuales de generación de sedimentos (en el área modelo de Masquefa) de 846±40 Mg ha^{-1} $año^{-1}$, y con tasas de erosión neta de 576±58 Mg ha^{-1} $año^{-1}$, lo cual supone una tasa de exportación de sedimentos del 68%. Esta tasa neta promedio representa 2,78 veces la erosión producida por eventos extremos de precipitación en parcelas de viña, lo cual indica la importancia de los procesos de erosión por barrancos en la generación de sedimentos en el área de estudio.

El análisis multitemporal de la cubierta vegetal de las paredes de los barrancos muestra que su variación está influenciada por los cambios en los usos del suelo de la cabecera de los

mismos. Estos cambios producen un incremento de la escorrentía superficial y, por tanto, una pérdida de suelo agrícola. Esta pérdida mejora las condiciones de crecimiento de la cubierta vegetal en las paredes de los barrancos, pero el incremento de la escorrentía superficial favorece los movimientos en masa y, por tanto, el retroceso de los barrancos en las áreas de las cabeceras previamente no erosionadas.

Dentro de los barrancos, los movimientos en masa tienen lugar, principalmente, por escorrentía superficial y por coladas de barro que provocan las tormentas de gran intensidad. Esto supone la eliminación de la vegetación que crece en las secciones medias y bajas de los barrancos. La erosión medida en los barrancos durante el periodo de estudio indica que la cubierta vegetal no impide los movimientos en masa ni el retroceso de los barrancos, aunque protege las paredes de las gotas de lluvia y de la erosión laminar y por surcos.

Además se ha puesto de manifiesto la importancia de los efectos de la erosión en las pérdidas suelo y en el balance económico del cultivo de la viña en la DO Penedès. Las pérdidas de suelo son muy superiores a las pérdidas anuales tolerables para un mantenimiento sostenible del sistema. Por otra parte se ha de tener en cuenta el coste de reemplazamiento de los nutrientes y la reposición de las estructuras dañadas. También hay que tener en cuenta que estos datos son aún por defecto, ya que no se consideran otros efectos como podrían ser los daños a estructuras que se encuentran fuera de las parcelas y las pérdidas de productividad a largo plazo.

La consideración de los casos "sin" prácticas de conservación (no existencia de *rasas* y el no relleno de los regueros y las cárcavas incipientes) se ha demostrado económicamente más favorable para el agricultor en el corto plazo. Sin embargo, en el largo plazo, los daños ocasionados por la erosión y la incisión de los barrancos podrían llegar a destruir las parcelas y sus infraestructuras, haciendo disminuir, año a año, su productividad y, por tanto, la rentabilidad de las explotaciones.

Aunque los resultados económicos sólo muestran una visión parcial de los costes de la erosión en zonas vitícolas de la DO Penedès, pueden ser útiles para mostrar la dimensión del problema a escala de parcela. De esta forma, el hecho de transformar los efectos de la erosión a términos económicos puede facilitar la comprensión del problema por parte de los agricultores y los planificadores, al dejarles ver la necesidad de promover y/o implementar medidas de conservación.

Los resultados aquí mostrados, procedentes de estudios realizados en la décadas 1990 y 2000, son de plena vigencia o incluso siguen en aumento. Las nuevas plantaciones de viñedo han seguido realizándose con el mismo tipo de criterios, sin la introducción de medidas de conservación. Además la agresividad del clima parece ir en aumento, con aún mayor irregularidad en su distribución y un aumento de eventos erosivos extremos, de elevada magnitud, lo que hace, si cabe, más necesaria la implementación de medidas de conservación de suelos y agua.

4.3.6. Referencias bibliográficas

BOIXADERA, J. *Proyecto de un área modelo de conservación de suelos en Piera-Masquefa.* Proyecto Final de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Lleida, Lleida. (1983).

BUFALO, M.; NAHON, D. Erosional processes of Mediterranean badlands: a new erosivity index for predicting sediment yield from gully erosion. *Geoderma,* 52 (1992) p 133-147.

DEROSE, R.C.; GÓMEZ, B.; MARDEN, M.; TRUSTRUM, N.A., 1998. *Gully erosion in Mangatu forest, New Zealand, estimated from digital elevation models.* Earth Surface Processes and Landforms, 23, p.1045–1053.

FAULKNER, H.; SPIVEY, D.; ALEXANDER, R. The role of some site geochemical processes in the development and stabilisaion of three badland sites in Almería, Southern Spain. *Geomorphology*, 35 (2000).p 87-99.

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

LÓPEZ. C. *Establecimiento de un plan de conservación de suelos en un área modelo de 490 ha en el Alt Penedès-*. PFC Universidad de Lleida. (1994).

MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A. *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.* Tesis doctoral, Universidad de Lleida, Lleida. (1998).

MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A.; POCH, R.M. Estado de conservación de los suelos de la cuenca del embalse Joaquín Costa. *Limnética*, 14 (1998), p 83-91.

MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A. A spatial information technology approach for the mapping and quantification of gully erosion. *Catena*, 50 (2-4) (2003),p 293-308.

MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A.; RAMOS, M.C.; RIBES-DASI, M. Soil erosion caused by extreme rainfall events: Mapping and quantification in agricultural plots from very detailed digital elevation models. *Geoderma,* 105 (2002), p 125-140.

Martínez-Casasnovas J.A.; Antón-Fernández C.; Ramos, M.C. Sediment production in large gullies of the Mediterranean area (NE Spain) from high-resolution digital elevation models and geographical information systems analysis. Earth Surface Processes and Landforms, 28 (2003), p 443-456

MARTÍNEZ-CASASNOVAS J.A.; RAMOS, M.C.; POESEN, J. Assessment of sidewall erosion in large gullies using multi-temporal DEMs and logistic regression analysis. *Geomorphology* 58 (2004), p 305–321.

MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A.; RAMOS, M.C.; RIBES-DASI, M. On-site effects of concentrated flow on erosion in vineyard fields: some economical implications. *Catena,* 60 (2005) p 129-146.

MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A.; RAMOS, M.C. The costs of soil erosion in Vineyard Fields in the Penedès - Anoia Region (NE Spain). *Catena*, 68 (2006), p 194-199

MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A.; RAMOS, M.C., GARCÍA-HERNÁNDEZ, D. Effects of land-use changes in vegetation cover and sidewall erosion in a gully head of the Penedès region (northeast Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34 (2009), p 1927-1937.

NACCI, S. *Alteraciones en el régimen hídrico del suelo asociadas a la sistematización y cambios en el manejo de tierras con viña de secano en el Anoia - Penedès.* Tesis doctoral, Universidad de Lleida, Lleida. (2001).

POESEN, J.; VANDAELE, K.; VAN WESEMAEL, B. Gully erosion: Importance and model implications. En: *Modelling soil erosion by water* (Boardman, J., Favis-Mortlock, D., Eds.). NATO ASI Series, Vol. I 55 (1998). Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, p. 285-311.

POESEN, J.; VANWALLEGHEM, T.; DE VENTE, J.; KNAPEN, A.; VERSTRAETEN, G.; MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A. Gully erosion. Chapter 2.5. En: *Soil Erosion in Europe* (Boardman, J., Poesen, J., Eds.). John Wiley & Sons Inc., Chichester, England, (2006), p. 515-536.

PORTA, J.; RAMOS, M.C.; BOIXADERA, J. Mechanical measures for runoff management and erosion control in the vineyards of North East Spain. En: *Conserving soil resources:*

European perspective (Rickson, R.J., Ed.), CAB International, Wallingford, (1994),p. 369-378.

RAMOS, M.C.; PORTA, J. Rainfall intensity and erosive potential in NE Spain Mediterranean area. First results on sustainability of vineyards. *Il Nuovo Cimento*, 17(1994), p 291-299.

RAMOS, M.C. Rainfall distribution patterns and their changes over time in a Mediterranean area. *Theoretical and Applied Climatology*, 69 (2001), p163-170.

RAMOS M.C.; PORTA, J. Características erosivas de las lluvias en el área mediterránea: Intensidad y energía cinética. *Información Tecnológica*, 11 (2000), p 9-14

RENARD, K.G.; FOSTER, G.R.; WEESIES, G.A.; PORTER, J. P. RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation. *Journal of soil and water conservation* 46 (1991), p 30-33.

SOIL SURVEY STAFF, *Keys to Soil Taxonomy, 8th edition*. U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Washington, D.C. (1999).

STROOSNIJDER, L.; EPPINK, L.A.A.J. *Principles of soil and water conservation*. Lecture notes of course K200-500/510. WAU. Wageningen, The Netherlands. (1993).

USÓN, A. *Medidas de control de la erosión en suelos de viña de las comarcas Anoia - Alt Penedès (Barcelona): Efectividad y viabilidad*. Tesis doctoral. Universidad de Lleida, Lleida. (1998).

VAN OOST, K.; GOVERS, G.; DESMET, P.J.J. Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage. *Landscape Ecology* 15 (2000), p 577-589.

VANDEKERCKHOVE, L.; POESEN, J.; OOSTWOUD WIJDENES, D.; GYSSELS, G. Short-term bank gully retreat rates in Mediterranean environments. *Catena*, 44 (2001), p 133-161.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning*. USDA Agricultural Handbook No. 537, Washington, D.C. (1978).

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

4.4. Aplicación de la cartografía de suelos muy detallada en la gestión de los viñedos

Josep Miquel Ubalde[1], Xavier Sort[1] y Rosa Maria Poch[2]

(1) Bodegas Miguel Torres, C/Miquel Torres i Carbó 6, 08720 Vilafranca del Penedès (Barcelona).
(2) Universitat de Lleida, C/Rovira Roure 191, 25198 Lleida.

Resumen

Hace aproximadamente diez años Bodegas Miguel Torres apostó por la cartografía de suelos a escala 1:5.000 como herramienta básica para optimizar la calidad de la uva y el vino. Los mapas de suelos han contribuido a la mejora de la gestión de los viñedos, ya que se tiene un mejor conocimiento de la variabilidad del suelo y de la aptitud del medio para la vid. Se dispone también de una información de base para el manejo a nivel de subparcela y para la aplicación de nuevas tecnologías de la viticultura de precisión. El mayor control del manejo vitícola que se consigue también puede contribuir a la mitigación del calentamiento global, con la aplicación de prácticas orientadas al secuestro de carbono, la mejora de la eficiencia del uso del agua y la integración de criterios de sostenibilidad ambiental y paisajística. Al final del capítulo se describen de forma general los procesos formadores y la clasificación de los suelos predominantes en la zona vitícola del Penedès, y se presenta la descripción de un perfil típico de las plataformas geomorfológicas residuales (Calcisol).

4.4.1. Introducción

Los estudios de zonificación vitícola, entendida como la caracterización espacial de zonas que pueden producir uva y vino de composición similar (Vaudour, 2003), han tenido un considerable aumento en los últimos 10 años, debido en gran parte al crecimiento de la producción de vino a nivel mundial. Este aumento de producción ha creado un mercado altamente competitivo, y las zonas productoras de vino han utilizado la diferenciación del producto según su origen como una estrategia para expandir su mercado. Por otro lado, la necesidad de optimización de la calidad del producto y el desarrollo de nuevas tecnologías de viticultura de precisión han dado un empujón a los estudios de zonificación vitícola orientados hacia la delimitación de unidades homogéneas que permitan un manejo diferenciado, una selección de los mejores terrenos para el cultivo de la vid, una variedad concreta o un portainjerto determinado (Vaudour y Shaw, 2005).

Existen diferentes aproximaciones a los estudios de suelos orientados a la zonificación vitícola, pero los métodos que proveen más información son las técnicas de cartografía de suelos, ya que permiten determinar la variabilidad espacial de propiedades edáficas, así como clasificar suelos según su potencial vitícola (Van Leeuwen and Chéry, 2001). Además, a partir de un mapa de suelos se pueden crear mapas de manejo vitícola. Por estos motivos, los mapas de suelos se suelen utilizar como cartografía de base en los estudios de zonificación.

Hace aproximadamente diez años, Bodegas Miguel Torres, una compañía comprometida con ofrecer productos de alta calidad, apostó por la cartografía de suelos como herramienta básica para optimizar la calidad de la uva y el vino, a través de la implementación de prácticas vitícolas que considerasen la variabilidad de los suelos dentro de los viñedos. En el método utilizado se delimitaban unidades cartográficas siguiendo los criterios del Soil Survey Manual (SSS, 1993). Este método está basado en el sistema de clasificación Soil Taxonomy (SSS, 2006), que es el sistema utilizado por las instituciones oficiales del área de estudio (Porta *et al.*, 2009).

4.4.2. Cartografía de suelos a escala muy detallada

La cartografía de suelos se realizó aplicando los criterios del Soil Survey Manual (SSS, 1993) a escala 1:5.000 (figura 1). Cuando se trabaja a nivel de parcela, se recomienda un nivel de información muy detallado, con escala mayores de 1:15.840 (SSS, 1993) o 1:5.000 (FAO, 1979). Gómez-Miguel y Sotés (2001) demostraron la aptitud de la escala 1:5.000 para estudios muy detallados de zonificación vitícola. En el método aplicado se delimitaban unidades cartográficas mediante polígonos, a partir de observaciones de suelo seleccionadas según diferentes unidades de paisaje y unidades litológicas. La densidad de observaciones era de 1 observación por cm^2 de mapa, de las cuales una sexta parte correspondían a calicatas y el resto a sondeos con barrena. A una escala 1:5.000, esta densidad resultó en 4 observaciones por hectárea. Aplicando una relación calicata:sondeo de 1:5, se abrieron 0,7 calicatas por hectárea. Esta densidad es superior a la recomendada en diversos trabajos (FAO, 1979; Legros, 1996). La profundidad de los perfiles era 200 cm o menos si había una capa limitante para las raíces.

FIGURA 1. Metodología de la cartografía de suelos. Autor: J.M. Ubalde.

De cada perfil, se realizó una descripción de campo, con una descripción del lugar (localización, régimen de temperatura y humedad del suelo, clase de drenaje, profundidad de la capa freática, geomorfología, geología y pedregosidad superficial) y una descripción del perfil (profundidad de los horizontes, color Munsell, manchas, elementos gruesos, estructura, consistencia, cementaciones, efervescencia al ácido clorhídrico, raíces, poros, grietas, actividad biológica y humana, acumulación de materiales y rasgos superficiales en agregados y poros) (CBDSA, 1983; Schoeneberger *et al.*, 2002; Porta y López-Acevedo, 2005). Además, para cada horizonte, se analizaron propiedades físicas y químicas, según el Soil Survey Laboratory Methods Manual (USDA, 1996). Las propiedades físicas seleccionadas fueron la textura (método de la pipeta), humedades a -33 kPa y -1500 kPa (extracción en placas de presión a partir de muestras disturbadas) y densidad aparente (métodos del agregado, del agujero o del cilindro, según la consistencia del suelo). Las propiedades químicas seleccionadas fueron el pH (suspensión 1:2.5 suelo:agua), conductividad eléctrica (suspensión 1:5 suelo:agua), materia orgánica (Walkley-Black), nitrógeno (Kjeldahl), carbonato cálcico (calcímetro de Bernard), caliza activa (Nijelsohn), yeso (extracción con acetona), hierro (extracción con EDTA), fósforo (Olsen), capacidad de intercambio catiónico y bases intercambiables (extracción con acetato amónico). En algunos casos, se realizaron estudios micromorfológicos para identificar procesos formadores que eran difíciles de detectar a simple vista (Ubalde *et al.*, 2011).

Finalizada la caracterización de los perfiles, se procedió a su clasificación según Soil Taxonomy (SSS, 2006). Este sistema de clasificación está organizado en diferentes niveles: Orden, Suborden, Grupo, Subgrupo, Familias y Series. Los Órdenes y Subórdenes se definen por los factores y procesos formadores de suelos. Los Grupos y Subgrupos se determinan por similitudes en el tipo, disposición y grado de desarrollo de los horizontes pedogenéticos, los regímenes de humedad y temperatura del suelo y el estado de las bases. Conceptualmente,

los Grupos de Suelos de Referencia del World Reference Base (FAO/ISSS/ISRIC, 2006) podrían corresponderse a un nivel intermedio entre los Órdenes y los Grandes grupos. El nivel de Familia se define por propiedades químicas y físicas que afectan el manejo. Finalmente, las series son el nivel más detallado, agrupan los suelos por las similitudes en su edafogénesis y sus propiedades físicas y químicas. Cada serie consiste en conjuntos de suelos que son similares en color, textura, estructura, pH, consistencia, composición mineral y química, y disposición en el perfil. Las series definidas no se correlacionaron con las series del catálogo de las instituciones oficiales.

Las series de suelos fueron utilizadas para delinear las unidades cartográficas, siguiendo los criterios de Van Wambeke and Forbes (1986). Los límites de las unidades se determinaron mediante observaciones del suelo, buscando diferencias de pendiente, paisaje, color, pedregosidad superficial, etc. Cuando se dispone de todas las unidades, éstas se listan y codifican y se diseña la leyenda del mapa. El mapa de suelos resultante se digitaliza e introduce en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Por otro lado, todos los datos generados durante la cartografía se almacenan en una base de datos relacional que, junto con el mapa de suelos en formato digital, pasa a formar parte del SIG de suelos.

4.4.3. Aplicación del mapa de suelos para el manejo de las fincas

La organización de la cartografía de suelos en un SIG permite, de una forma relativamente fácil, la edición de mapas de suelos, mapas temáticos de suelos (textura, carbonatos, etc.), mapas de zonificación vitícola (riesgo de clorosis férrica, aptitud de variedades de viña, etc.) y mapas de manejo a nivel de subparcela (fertilización de precisión).

En la figura 2 se muestra el diagrama de flujo de un ejemplo de zonificación vitícola a partir de mapas temáticos de suelos, que han sido elaborados mediante el SIG de suelos. Este diagrama trata de ejemplificar como realizar un mapa de portainjerto óptimo, a partir un mapa de riesgo de sequía, otro de riesgo de clorosis férrica y otro de salinidad. El mapa de riesgo de sequía se determinaría a partir de los mapas de profundidad efectiva y capacidad de retención de agua. El mapa de riesgo de clorosis se determinaría combinando los mapas de caliza activa con el de hierro. Finalmente, el mapa de salinidad se obtendría a partir de la reclasificación del mapa de conductividad eléctrica.

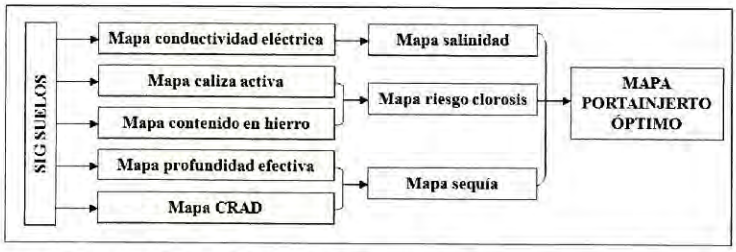


FIGURA 2. Procedimiento de elaboración de un mapa de portainjerto óptimo a partir de un mapa de suelos muy detallado. Autor: J.M. Ubalde.

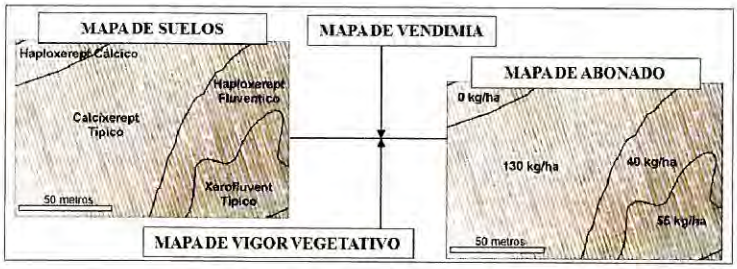


FIGURA 3. Procedimiento de elaboración del mapa de abonado a nivel de subparcela a partir de mapas de suelos muy detallados. Autor: J.M. Ubalde.

En la figura 3 se ilustra cómo se determina el mapa de fertilización a nivel de subparcela, utilizando el mapa de suelos como cartografía de base y combinándolo con otros mapas vitícolas (producción y vigor). Este mapa de fertilización se introduce en una abonadora de

aplicación variable, que puede aplicar diferentes dosis de fertilizante, según la posición determinada por un GPS (Sort y Ubalde, 2005).

De ese modo, se puede observar que los mapas de suelos a escala 1:5.000 contribuyen a la mejora de la gestión de los viñedos, ya que se tiene un mejor conocimiento de la variabilidad de la aptitud del medio para la vid (p.e. selección de portainjertos), se dispone de una información de base para el manejo a nivel de subparcela (p.e. plan de abonado) y también para la aplicación de nuevas tecnologías de viticultura de precisión (p.e. abonadora de aplicación variable con GPS).

Por otro lado, los mapas de suelos son especialmente interesantes en el contexto actual de lucha contra el cambio climático. El cambio climático supone una amenaza para la calidad de las vendimias, así como para la aptitud del terreno para el cultivo de la viña, poniendo en peligro el sistema productivo establecido a lo largo de los siglos. La mejora en el entendimiento del agrosistema y el control del manejo, que se consigue con los estudios de zonificación vitícola, son un paso necesario para hacer frente a estas amenazas. El mayor control del manejo vitícola también puede contribuir a la mitigación del calentamiento global, con la aplicación de prácticas orientadas al secuestro de carbono, la mejora de la eficiencia del uso del agua y la integración de criterios de sostenibilidad ambiental y paisajística. La integración de estos criterios supone además un valor añadido a los productos vitícolas, ya que el consumidor cada vez valora mejor los productos sostenibles con el medio ambiente y que minimizan las emisiones de carbono.

4.4.4 Estudio de casos: los suelos de los viñedos del Penedès

La depresión del Penedès es una fosa tectónica en dirección NE - SW rodeada por los macizos de Sistema Mediterráneo, formados durante la orogénesis alpina. Por el N y NW limita con la Cordillera Prelitoral (macizos del Gaià y del Congost-Anoia), y por el S y SE con la Cordillera Litoral (Macizo del Garraf). Igual que en la Depresión Reus-Valls, los materiales de la depresión del Penedès se depositaron durante el mioceno.

En general, los materiales geológicos del Penedès son ricos en carbonato cálcico, por lo que los procesos formadores de suelos relacionados con los carbonatos están bien representados. La mayor parte de las acumulaciones de carbonatos son debidas a la precipitación de calcita de soluciones saturadas, que provienen de horizontes superiores o de flujos laterales de agua debidos a un horizonte impermeable. Sin embargo, algunas acumulaciones de carbonatos son debidas a la actividad biológica, que actúa causando una microdistribución de carbonatos en bioporos. Los edaforrasgos de las acumulaciones biológicas son rellenos de calcita citomórfica (quesparita) en poros (figura 4). Los edaforrasgos de iluviación de carbonatos son representativos de diferentes grados de calcificación. Primero, un proceso de cristalización produce cristales aciculares y algunos hiporevestimientos de micrita y microesparita (figura 5). Luego, un proceso de recristalización produce abundantes revestimientos y hiporevestimientos bien desarrollados, pendents, nódulos y rellenos de esparita y microesparita (figura 6). En estadios más desarrollados, los carbonatos (micrita) empiezan a ocupar la micromasa. En este estadio, pueden ocurrir procesos de desplazamiento y reemplazamiento de componentes gruesos (figura 7) o de revestimientos de arcilla. El estadio más evolucionado se correspondería a cementaciones de carbonatos (horizontes petrocálcicos).

La mayoría de los suelos del Penedès se clasifican como Inceptisoles (Cambisoles/Calcisoles), debido a que las acumulaciones de carbonatos están suficientemente expresadas para identificar horizontes cámbicos, cálcicos o petrocálcicos. En general, los suelos con acumulaciones de carbonatos se clasifican como Calcixerepts Típicos (figura 6 y 7). Sin embargo, no todos los suelos pueden ser clasificados como Calcixerepts (Calcisoles),

ya que no cumplen los criterios de un horizonte cálcico. Un horizonte cálcico requiere un cálcico espesor mínimo de 15 cm, un contenido mínimo en $CaCO_3$ del 15% y carbonato secundario identificable, con algunas excepciones. Algunos de los suelos descritos mostraban acumulaciones incipientes, pero con el contenido en CaCO3 demasiado bajo. En este caso, las acumulaciones llevan a un horizonte cámbico, y los suelos se clasifican como Haploxerepts (Cambisoles). Incluso en algunos casos, cuando las acumulaciones de carbonatos no son visibles a simple vista (solamente con microscopio), no se puede determinar un horizonte cámbico, y los suelos se clasifican como Entisoles (Regosoles/Fluvisoles). Este es el caso de algunos Xerofluvents típicos (Fluvisoles), con redistribuciones de carbonatos en forma de cristales aciculares de calcita y cristales de quesparita (figura 4 y 5).

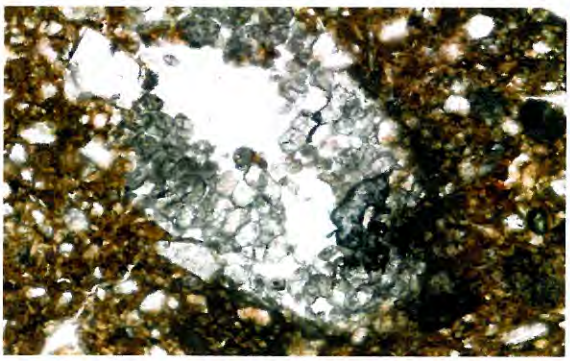


FIGURA 4. Acumulación de carbonatos de origen biológico en Xerofluvents típicos: rellenos de calcita citomórfica en poros (3,36 mm ancho, PPL) Autor: J.M. Ubalde.

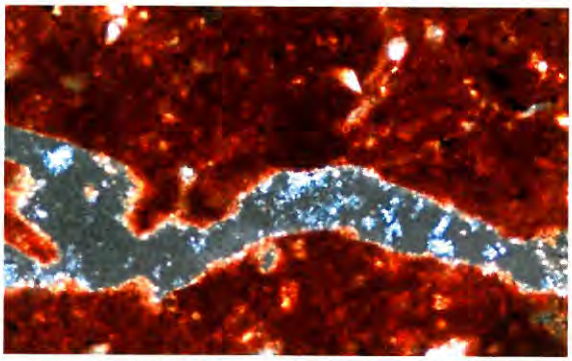


FIGURA 5. Redistribución de carbonatos en Xerofluvents típicos: rellenos de cristales aciculares y hiporevestimientos de micro-esparita (1,26 mm ancho, XPL). Autor: J.M. Ubalde.

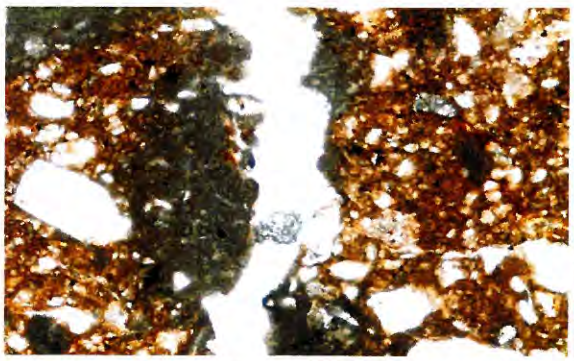


FIGURA 6. Redistribución de carbonatos en Calcixerepts típicos: hiporevestimientos de microesparita bien desarrollados (3,36 mm ancho, PPL). Autor: J.M. Ubalde.

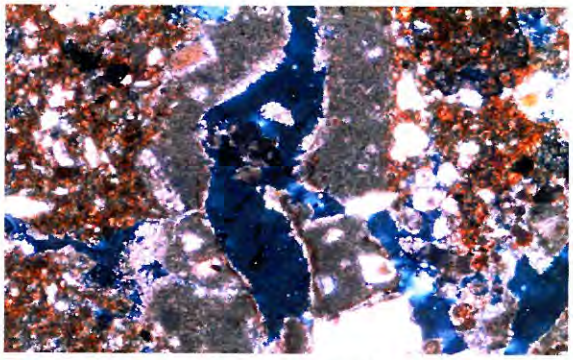


FIGURA 7. Hiporevestimientos de microesparita y micrita en poros, con desplazamiento de granos en su margen interior (1,5 mm ancho, XPL). Autor: J.M. Ubalde.

Los procesos de acumulación de carbonatos en el Penedès están muy evolucionados, hecho que se refleja con contenidos en carbonato cálcico muy altos, superiores al 70%, y con las cementaciones de carbonatos. La evolución de los carbonatos en estos suelos puede ser un factor limitante para el cultivo de la viña, debido a la clorosis férrica. Los carbonatos incrementan la concentración del anión HCO_3^- en la solución del suelo, bloqueando la absorción de hierro por las plantas. Las principales consecuencias son el raquitismo, la destrucción de follaje, la reducción de la producción e incluso la muerte de la planta. Estos problemas se pueden evitar con la elección de portainjertos resistentes, como el 41B y 140R. Por otro lado, los procesos intensos de acumulación de carbonatos, que llevan a la cementación de la micromasa, constituyen una limitación para el desarrollo del sistema radicular. Además, las acumulaciones en forma de nódulos incrementan el contenido en elementos gruesos, reduciendo la capacidad de retención de agua disponible (CRAD). En los horizontes profundos de un Calcixerept típico, se cuantificó una pérdida de 11 mm de CRAD (entre los 50 y 100 cm de profundidad), considerando un volumen de acumulaciones de

carbonatos del 20%. Sin embargo, las principales implicaciones de las acumulaciones de carbonatos en el manejo de la vid están relacionadas con la selección del portainjerto y labranza, que no debe ser demasiado profunda para evitar mezclar los horizontes cálcicos con los horizontes superficiales.

A continuación, se presentan la descripción de campo, los datos analíticos y la descripción micromorfológica de un suelo representativo de las plataformas residuales del Penedès. Estos suelos se han formado a partir de los sedimentos que se han acumulado durante el Cuaternario encima de los depósitos miocénicos.

4.4.4.1. Perfil: 33

Información general

FECHA DESCRIPCIÓN: 15/02/02
DESCRIPTORES: Josep Miquel Ubalde
LOCALIZACIÓN: Pacs del Penedès

Geomorfología

ALTITUD (M): 223
FORMA DEL RELIEVE: Plataforma residual
PENDIENTE: 5-10 %
ORIENTACIÓN: Suroeste

Temperatura y agua del suelo

REGIMEN DE TEMPERATURA: Térmico
RÉGIMEN DE HUMEDAD: Xerico
NIVEL FREATICO: Inaccesible
CLASE DE DRENAJE: Bien drenado

Material original

Materiales detríticos terrígenos finos y gravas

Uso del suelo

CULTIVO: Viña
TECNOLOGIA: Secano

Clasificación

SSS 1999: Calcixerept típico, esquelética franca, carbonática, térmica

FAO, ISS, ISRIC 1998: Calcisol esquelético hipercálcico

FIGURA 8. Perfil 33.

Descripción macromorfológica de los horizontes (nomenclatura SINEDARES)

0-15 cm Ap1

COLOR (de la matriz del suelo): 10YR 5/4 (en húmedo). MANCHAS: Inexistentes. ELEMENTOS GRUESOS: abundantes (35-70%), gravas, subredondeado-tabulares, sin orientación, distribución irregular, calizas. TEXTURA: Franco-arenosa. ESTRUCTURA: Moderada, en bloques, mediana. COMPACIDAD: Poco compacto, muy friable. RAÍCES: Pocas, finas, distribución irregular, sin orientación, vivas. TEST DE CAMPO. Reacción de la matriz al HCl 11%: Muy alta. LÍMITE INFERIOR: abrupto por laboreo, plano. HORIZONTE DIAGNÓSTICO: ÓCRICO.

15-30/40 cm Ap2

COLOR (de la matriz del suelo): 10YR 5/4 (en húmedo). MANCHAS: Inexistentes. ELEMENTOS GRUESOS: abundantes (35-70%), gravas, subredondeado-tabulares, sin orientación, distribución irregular, calizas. TEXTURA: Franco-arenosa. ESTRUCTURA: Moderada, en bloques, gruesa. COMPACIDAD: Compacto, friable. RAÍCES: Abundantes, de finas a gruesas, distribución irregular, horizontales, vivas. ACUMULACIONES: Pocos (<5%), nódulos, de carbonato, tamaño medio, ligeramente duros. TEST DE CAMPO. Reacción de la matriz al HCl 11%: Muy alta. LÍMITE INFERIOR: neto, ondulado. HORIZONTE DIAGNÓSTICO: ÓCRICO.

30/40-50 cm BWkm

COLOR (de la matriz del suelo): 7,5YR 7/6 (en húmedo). MANCHAS: Inexistentes. ELEMENTOS GRUESOS: abundantes (35-70%), de gravas a cantos, subredondeado-tabulares, sin orientación, distribución irregular, calizas. TEXTURA: Franco-arenosa. ESTRUCTURA: Moderada, prismática, muy gruesa. COMPACIDAD: Muy compacto, muy friable. RAÍCES: Frecuentes, de finas a medianas, las más gruesas aplastadas, distribución irregular, sin orientación,

vivas. ACUMULACIONES: Abundantes (20-40%), nódulos en forma de rizoconcrecciones, gruesos, blandos y ligeramente duros; y pseudomicelios, finos, blandos, en poro. TEST DE CAMPO. Reacción de la matriz al HCl 11%: Muy alta. HORIZONTE DIAGNÓSTICO: CÁLCICO.

Datos analíticos

Horizonte genético	pH H_2O 1:2.5	CE 1:5 (dS/m a 25° C)	Materia orgánica (%)	Carbono orgánico (%)	N Kjeldahl (%)	Carbonato cálcico eq. (%)	Caliza activa (%)	Fe s.m.s. (mg/kg)	P Olsen (mg/kg)	K $AcONH_4$ (mg/kg)
Ap1	8,6	0,18	1,4	0,8	0,09	76	15	36	23	94
Ap2	8,6	0,18	1,2	0,7	0,06	73	16	50	11	96
Bwkn	8,3	0,60	0,3	0,2	0,02	69	9	36	2	131

Horizonte genético	Arena 2,0-0,05 mm	Limo 0,05-0,002 mm	Arcilla <0,002 mm	Clase textural USDA*	Densidad aparente (kg/m³)	Elementos gruesos (% vol.)	Grava fina 0.2-0.4 cm	Grava media 0.4-1.6 cm	Grava gruesa 1.6-6.4 cm	Cantos 6.4-25 cm
Ap1	60,1	29,1	10,8	FAr	1198	46	50	50	0	0
Ap2	60,3	28,4	11,3	FAr	1196	37	3	7	90	0
Bwkn	60,5	30,9	8,6	FAr	1390	35	0	20	80	0

Horizonte genético	CIC cmol+/kg	Ca^{2+} cmol+/kg	Mg^{2+} cmol+/kg	Ca^{2+} + Mg^{2+} cmol+/kg	Na^+ cmol+/kg	K^+ cmol+/kg	V %	Humedad a -33 KPa (%)	Humedad a -1.500 KPa (%)	CRAD (mm/10 cm suelo)
Ap1	4,5	3,5	0,6	4,1	0,2	0,2	100	16	7	5,8
Ap2	4,4	3,4	0,6	4,0	0,2	0,2	100	17	8	6,8
Bwkn	3,9	2,7	0,7	3,4	0,2	0,3	100	13	4	8,1

* FAr: Franco-arenosa

Micromorfología

Lámina: 7/02 Horizonte genético: Bwkn Profundidad: 40-60 cm

Microestructura y porosidad	g/f	Componentes minerales gruesos	Micromasa	Componentes orgánicos	Edaforrasgos
Bien desarrollada, no acomodada, en bloques subangulares. Poros 35% : planares (0,2 mm)	Límite g/f: 40µm, relación g/f 1/2, porfírica doble	Arenas de cuarzos y feldespatos	Marrón amarillento, Limos y arcillas, Fábrica-b cristalítica y granoestriada	Ausentes	Revestimientos de poros y rellenos de cristales de esparita pseudohexagonales (0,25 mm) y microesparita y micrita. Cristales aciculares (<0,05 mm) de carbonatos en caras de poros. Nódulos impregnativos (0,75-1 mm), esferoidales, alterados. Nódulos impregnativos redox (0,1 mm), de Fe y Mn, límites irregulares (fig. 8). Hiporrevestimentos de calcita (fig . 6) microesparítica y micrítica, en poros.

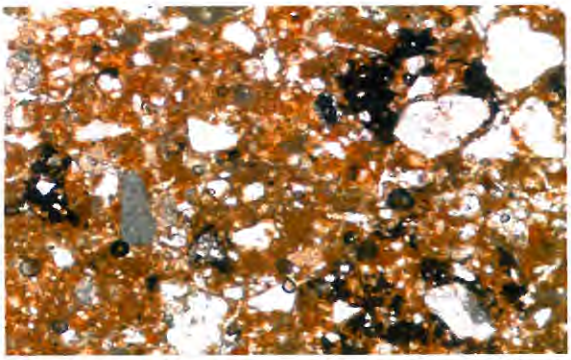


FIGURA 9. Nódulos impregnativos redox, límites irregulares, formas dendríticas (1,5 mm ancho, PPL). Autor: J.M. Ubalde.

4.4.5. Referencias bibliográficas

CBDSA. «SINEDARES. Manual para la descripción codificada de suelos en el campo». MAPA (1983), 137 p.

FAO. «Soil survey investigations for irrigation». FAO Soil Bulletin, núm. 42 (1979), 188 p.

FAO/ISSS/ISRIC. «World Reference Base for Soil Resources». World Soil Resources Report, núm. 103 (2006), 128 p.

GÓMEZ-MIGUEL, V; SOTÉS, V. «Convergencia metodológica en los estudios detallados y muy detallados de suelos aplicados a la microzonificación vitícola». En: 26th World Congress and General Assembly of the OIV, 11-18 October 2001, Adelaida, Australia, (2001), p. 234-249.

LEGROS, J.P. «Cartographies des sols». Presses polytechniques et universitaires romandes (1996), 321 p.

PORTA, J.; LÓPEZ-ACEVEDO, M. «Agenda de campo de suelos. Información de suelos para la agricultura y el medio ambiente». Ediciones Mundi-Prensa (2005), 541 p.

PORTA, J.; ARAN, M.; BOIXADERA, J. (coord.) «Mapa de Sòls de Catalunya 1:25000. 66-23 Isona». IGC – IEC (2009).

SCHOENEBERGER, P.J.; WYSOCKI, D.A.; BENHAM, E.C.; BRODERSON, W.D. (eds.) «Field book for describing and sampling soils, Version 2.0». Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE. (2002)

SOIL SURVEY STAFF (SSS) «Soil Survey Manual». Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 18 (1993).

SOIL SURVEY STAFF (SSS) «Soil Taxonomy: a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2nd. Edition». USDA Soil Conservation Service, Agricultural Handbook nº 436 (1999), 871 p.

SOIL SURVEY STAFF (SSS) «Keys to Soil Taxonomy, 10th ed». USDA-Natural Resources Conservation Service (2006), 341 p.

SORT, X.; UBALDE, J.M. «Aspectes de viticultura de precisió en la pràctica de la fertilització raonada». ACE Revista d'Enologia, núm. 73 (2005), p.18-21.

STOOPS, G. «Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections». Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI. (2003), 184 p.

UBALDE, J.M.; SORT, X.; POCH, R.M. «How soil forming processes determine soil-based viticultural zoning». Journal of Soil Science and Plant Nutrition, v. 11, núm. 1 (2011), p.100-126.

U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service «Soil Survey Laboratory Methods Manual». Soil Survey Investigations Reports, núm. 42 (1996), 693 p.

VAN LEEUWEN, C.; CHERY, P. «Quelle méthode pour caractériser et étudier le terroir viticole : analyse de sol, cartographie pédologique ou étude écophysiologique ?» In: Un raisin de qualité : de la vigne à la cuve, nº Hors Série du J. Int. Sci. Vigne Vin, (2001), p.13-20.

VAN WAMBEKE, A.; FORBES, T.R. (eds.) «Guidelines for Using "Soil Taxonomy" in the Names of Soil Map Units». Soil Manage. Support Serv. Tech. Monogr. 10. U.S. Dep. Agric., Soil Conserv. Serv., and Cornell Univ., Agron. Dep. (1986).

VAUDOUR, E. «Les terroirs viticoles. Définitions, caractérisation, protection». Ed. Dunod, Paris (2003), 293 p.

VAUDOUR, E.; SHAW, A.B. «A Worldwide Perspective on Viticultural Zoning». S. Afr. J. Enol. Vitic., v. 26, núm. 2 (2005), p.106-115.

4.5. Nivelación de tierras en l'Alt Penedès: efectos sobre el régimen hídrico de los suelos y sus consecuencias

Ildefons Pla Sentis[1] y Silvana Nacci[1]

(1) Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl, Universitat de Lleida. Av. Alcalde Rovira Roure, 191, 25198 Lleida.

Resumen

La comarca del Penedès es una de las zonas con mayor área plantada con viña de secano para la producción de vino y cava en Cataluña y España. En las últimas décadas, algunas de las áreas de producción con viña han sido abandonadas u ocupadas por otros desarrollos, principalmente urbanos e industriales. Sin embargo en otras se ha intensificado el cultivo, con nuevos sistemas de plantación, introducción de nuevas variedades y transformaciones de las tierras (mayormente nivelaciones) para facilitar la mecanización de todas las operaciones, incluyendo el control de malas hierbas y la cosecha. Las nivelaciones para permitir las plantaciones en largas líneas rectas, con emparrados, han llevado a grandes movimientos de tierra, con cortes y rellenos. Con ello, los suelos, mayormente desarrollados sobre lutitas calcáreas, han sufrido grandes cambios que afectan fundamentalmente al desarrollo de las raíces de la vid y sus propiedades hidrológicas, tanto del suelo superficial como del perfil del suelo. Para estudiar dichos cambios, sus efectos sobre el régimen y el balance hídrico de los suelos, y sus consecuencias sobre la conservación de suelos y agua y sobre la producción de la viña, se realizaron durante varios años investigaciones, especialmente a nivel de campo, en una plantación de viña en l'Alt Penedès que incluyeron un monitoreo continuo del régimen de humedad del suelo. Todo ello bajo las diferentes y variables condiciones del clima, en especial de las lluvias en la zona. Conjuntamente se validó un modelo con base hidrológica para poder simular el régimen hídrico del suelo bajo diferentes condiciones de uso y manejo de la viña, incluyendo el uso de coberturas vivas o muertas, con diferentes limitaciones en el desarrollo y profundización radicular, y bajo diferentes niveles, intensidades y distribución de las lluvias. Los resultados obtenidos permitieron deducir que las nuevas prácticas de manejo del cultivo y suelos, con una nivelación previa de las tierras, resultan en cambios drásticos en el régimen de humedad del suelo, con incrementos en la generación de escorrentía y erosión superficial y en la reducción de la retención de agua de lluvia en el suelo para la vid, lo cual afecta la cantidad y calidad de la producción de uva y vino. También permitieron deducir que algunas medidas propuestas para contrarrestar dichos efectos, como son el uso de pequeñas terrazas de absorción, de cultivos de cobertura y de enmiendas orgánicas, solo podrían ser efectivas bajo ciertas condiciones.

4.5.1. Introducción

La viña de secano para producción de vino es un cultivo tradicional en los terrenos agrícolas en pendiente de Cataluña. En la actualidad hay alrededor de 100.000 ha de viñas en Cataluña, la mayor parte de ellas de secano, que producen alrededor del 8% del vino y del 99 % del cava de toda España. En Cataluña, igual que en otras regiones mediterráneas de Europa, las viñas de secano han sufrido grandes cambios en las últimas décadas. En parte siguiendo políticas de la UE, algunos campos de cultivo han sido abandonados mientras que en otros, dedicados a la producción de vino y cava de alta calidad, han incrementado el área cultivada, con sistemas agrícolas más intensivos y altamente mecanizados (Pla y Nacci, 2003). En algunos casos se ha introducido el riego, generalmente por goteo, pero sólo para ser utilizado en forma controlada y limitada cuando se presentan situaciones de extrema sequía. La movilización de grandes volúmenes de suelo, en prácticas de terraceo y nivelación, utilizando maquinaria pesada para cambiar la topografía del terreno y facilitar la mecanización,

ha afectado las propiedades hidrológicas de los suelos y los drenajes naturales de las tierras, lo que ha incrementado generalmente los riesgos de erosión superficial y en masa, especialmente cuando se presentan eventos lluviosos extremos (Pla y Nacci, 2001; Nacci y col. 2002). Adicionalmente parece haber una tendencia al incremento de la frecuencia de años secos y al mismo tiempo de eventos de lluvia más extremos y agresivos, aparentemente como una consecuencia de cambios climáticos generales en la región Mediterránea.

La labranza ha sido utilizada tradicionalmente en los viñedos para el control de las malas hierbas y para la roturación del suelo superficial compactado o encostrado con el fin de facilitar la infiltración de agua de lluvia, para reducir las pérdidas de agua por evaporación y para mejorar la profundización de las raíces de la vid. Aunque se reconocen los posibles beneficios de la práctica de labranza cero asociada al uso de cultivos de cobertura, en especial para proteger la superficie del suelo del impacto directo de las gotas de lluvia, para incrementar el contenido de materia orgánica del suelo y para reducir la escorrentía y erosión superficial, se considera que en viñas de secano dichas coberturas podrían causar más deficiencias de agua y de N, en especial en años secos (Rupp y Fox, 1999).

Tomando en consideración los anteriores aspectos, se estudiaron durante varios años los efectos actuales y potenciales del acondicionamiento y manejo de las tierras sobre la conservación de suelos y agua. Los estudios tuvieron lugar en dos zonas adyacentes, representativas en cuanto a suelos, topografía, clima y cambios en el manejo de las tierras con viña del Alt Penedès. Los estudios incluyeron evaluaciones de las propiedades y procesos hidrológicos en suelos y tierras, utilizando un monitoreo continuo a nivel de campo y medidas de laboratorio. Los resultados de dichas evaluaciones se integraron utilizando el modelo SOMORE (Pla 1997, 1998, 2002) basado en procesos hidrológicos, lo que permitió a su vez deducir los problemas potenciales de erosión superficial y el régimen hídrico del suelo, y sus efectos sobre la sustentabilidad, cantidad y calidad de la producción de uvas y vino, bajo escenarios cambiantes de clima y condiciones de las tierras.

4.5.2. Materiales y métodos

4.5.2.1. Áreas experimentales

Las zonas de estudio están localizadas en una finca comercial representativa de la región del Alt Penedès (Cataluña), donde el área con viñas para la producción de vino y cava se ha incrementado en los últimos 25-30 años (figura 1). Dicho incremento ha estado acompañado de cambios drásticos en el manejo de las tierras y de las viñas, incluyendo la introducción de nuevas variedades y sistemas de plantación. El clima de la zona es Mediterráneo semiárido, con un promedio de lluvia anual de alrededor de 600 mm, muy irregularmente distribuidos, con una concentración de las lluvias en otoño-invierno y un verano muy seco. Las lluvias se caracterizan por una gran variabilidad de un año a otro (400-700 mm) (figura 2) y por su carácter tormentoso, principalmente en otoño y, ocasionalmente, en primavera. Los cambios climáticos previstos para el futuro podrían incrementar la irregularidad de las lluvias así como la frecuencia de años secos y la probabilidad de eventos extremos. El consumo de agua por parte de la vid durante su ciclo de desarrollo se caracteriza por mínimos requerimientos en los periodos previos a la floración y después de la cosecha (octubre a abril), y por máximos requerimientos en la parte media de la estación de crecimiento (mayo a julio). Si la capacidad de reserva de agua aprovechable en la zona radicular del suelo no es suficiente, las cantidades limitadas de lluvia durante la principal estación de desarrollo de la vid (junio-agosto) pueden conducir a un largo periodo de deficiencia de agua en el suelo, lo cual puede afectar el crecimiento, la producción y la maduración de la uva, aún a pesar de la capacidad natural de supervivencia de la vid bajo condiciones de sequía (Maigre y col. 1995).

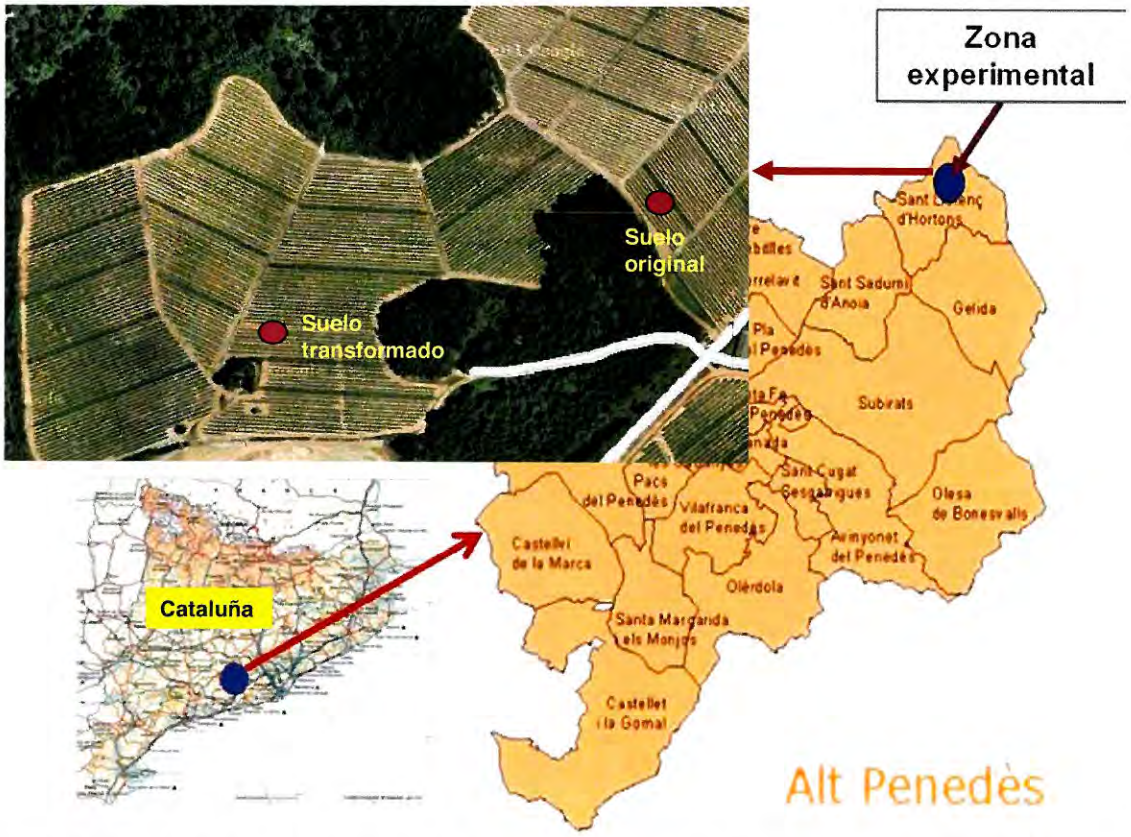
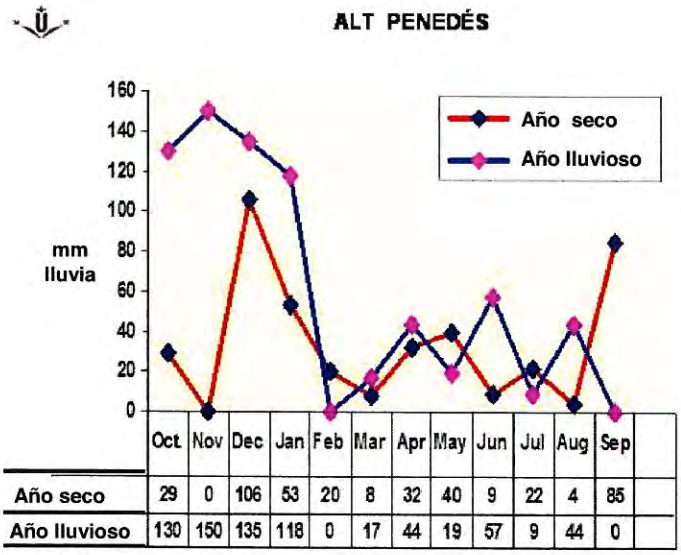


FIGURA 1. Localización e imagen de satélite de la zona experimental en el Anoia - Alt Penedès (41° 29' N, 1° 48' E). Fuentes: municat.gencat.cat; Google maps 2011.

Debido a la escasez de mano de obra disponible y con el propósito de reducir los costes de producción e incrementar la producción, la tendencia actual es a una completa mecanización de las operaciones agrícolas, incluyendo la cosecha. Para ello se requieren plantaciones de viña emparradas en hileras largas y rectas, con una distancia entre hileras de 2,4 a 3,2 m y, entre plantas, de 1,2 a 1,4 m. Esto provee una menor protección de la superficie del suelo que en los sistemas tradicionales de plantación, con crecimiento libre de las vides, aunque en ambos casos la protección es mínima en el periodo otoño-invierno, cuando suelen ocurrir las tormentas más intensas. Por otra parte, la necesidad de hileras largas y rectas hace que, en ocasiones, las mismas requieran ejecutarse en el sentido de la máxima pendiente. Todo ello obliga a realizar labores de nivelación, con fuertes movimientos de tierra que, generalmente,



	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep
Año seco	29	0	106	53	20	8	32	40	9	22	4	85
Año lluvioso	130	150	135	118	0	17	44	19	57	9	44	0

FIGURA 2. Distribución de la lluvia en dos años (ajustados al ciclo de desarrollo de la viña) seleccionados, uno seco(1985-1986) y otro lluvioso (1996-1997), en el Alt Penedès. Fuente: autores.

provocan cambios drásticos en la red superficial de drenaje superficial, en las propiedades de la superficie del suelo y en la profundidad efectiva de enraizamiento de la vid (Nacci et al, 2002; Pla y Nacci, 2003) (figura 3).

FIGURA 3. Viñas originales y transformadas tras labores de nivelación de las tierras en el Alt Penedès. Fuente: autores.

En la región del Alt Penedès la topografía es fuertemente ondulada, con colinas más o menos redondeadas, y campos de cultivo en pendientes de 4-20%, en cotas de 250-400 m. El suelo original, clasificado como Xerorthent, tiene generalmente un perfil poco desarrollado, que en el caso de la zona transformada es el resultado de las operaciones mecánicas de nivelación (decapitación del horizonte A original y trituración mecánica de la roca madre) para facilitar la mecanización (figura 4). Los suelos se han desarrollado a partir de lutitas calcáreas, y son muy pobres en materia orgánica (< 1,5%), altos en contenido de limo (40-60%) y muy ricos en carbonato de calcio (>30%). Tienen una gran susceptibilidad al sellado superficial por impacto de las gotas de lluvia, lo que provoca grandes pérdidas de agua por escorrentía y una fuerte erosión superficial en suelos desnudos, en especial en los suelos que han perdido el horizonte A en las nivelaciones.

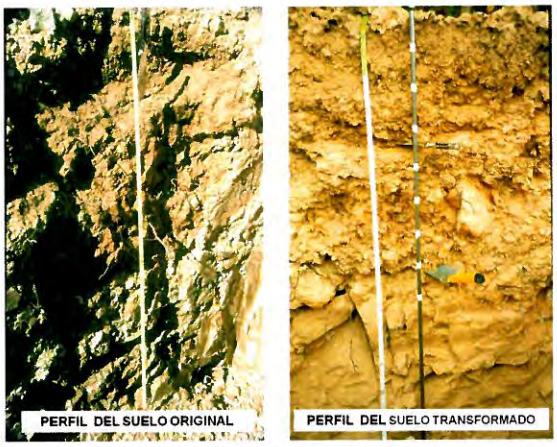


FIGURA 4. Perfiles de suelo en la zona de viñas sin transformar (original) y en la zona transformada. Fuente: autores.

FIGURA 5. Limitaciones en el desarrollo radicular de la viña en un suelo transformado (por labores de nivelación) en el Alt Penedès. Fuente: autores.

La labranza periódica no permite el desarrollo de raíces en los 15-20 cm superficiales del suelo, que generalmente son mantenidos en forma disgregada con terrones grandes para facilitar la infiltración del agua de lluvia, retrasar el sellado superficial, disminuir la evaporación de agua del suelo más profundo (efecto mulch) y controlar las malas hierbas (figura 5).

4.5.2.2. Mediciones y experimentos

La mayoría de los problemas de conservación de suelos y agua en la comarca del Alt Penedès están asociados con los efectos de los cambios climáticos y de los cambios en las prácticas de manejo de suelos y cultivo de la vid sobre el régimen de humedad del suelo, que es el factor más crítico en relación a la producción en cantidad y calidad de uvas para vino (Pla *et al.*, 2005). Se han realizado mediciones y continuo monitoreo bajo condiciones de campo de los parámetros hidrológicos más relevantes del suelo y de las características de la lluvia, complementados con mediciones de laboratorio. Los resultados han sido utilizados como la base para la aplicación y validación del modelo SOMORE (Pla, 1997, 2002), el cual permite la simulación y predicción de los regímenes de humedad del suelo y de los problemas potenciales asociados a la erosión del suelo y de suplencia de agua en las diferentes etapas de desarrollo de la vid (Pla, 1997; Pla y Nacci, 2001). En muchos casos hubo que hacer adaptaciones y cambios en las metodologías estándar para hacer mediciones adecuadas, en especial bajo condiciones de campo (tabla 1).

TABLA 1. Algunas características y propiedades hidrológicas de los suelos en zonas experimentales del Alt Penedès (PRE: Profundidad radicular efectiva (95% de las raíces); CRAU: Capacidad de retención de agua utilizable por la viña; V.Inf.: Velocidad de infiltración del agua de lluvia; Ksat (SS): Conductividad hidráulica saturada del subsuelo; SC: Sin cobertura; CC: Con cobertura). Fuente: autores.

Zona	% Pendiente	cm PRE	mm CRAU	mm Saturación	mm/hora		
					V Inf.		Ksat
					SC	CC	(SS)
Original	10	20-80	200	240	20	50	3
Transformada	6	15-60	120	150	5	20	1

Aquí presentamos los resultados, derivados de las mediciones de campo y del continuo monitoreo en sitios seleccionados dentro de un campo comercial plantado con viña de la variedad Chardonay. Se han simulado, con el modelo SOMORE, las condiciones más generalizadas de suelos, pendiente y manejo. Entre los diferentes tratamientos se incluyeron el actual manejo con labranza continua sin cobertura (SC) y el uso potencial, ya probado en algunas fincas de la región, de coberturas vivas (CC) durante el periodo de reposo (octubre a mayo) seguido de la cobertura con los residuos secos durante el resto de los periodos de desarrollo. Se presentan los resultados en dos estaciones de crecimiento seleccionadas, la más seca y la más lluviosa de los últimos diez años con periodos de retorno de alrededor de 5 años. En ambas la lluvia se concentró en el periodo otoño-invierno. Las dos condiciones de suelo incluidas son la de un suelo prácticamente no alterado por las labores de nivelación (original) y la de una tierra y suelo fuertemente alterados (transformado) por las labores de nivelación (figura 6 y 7).

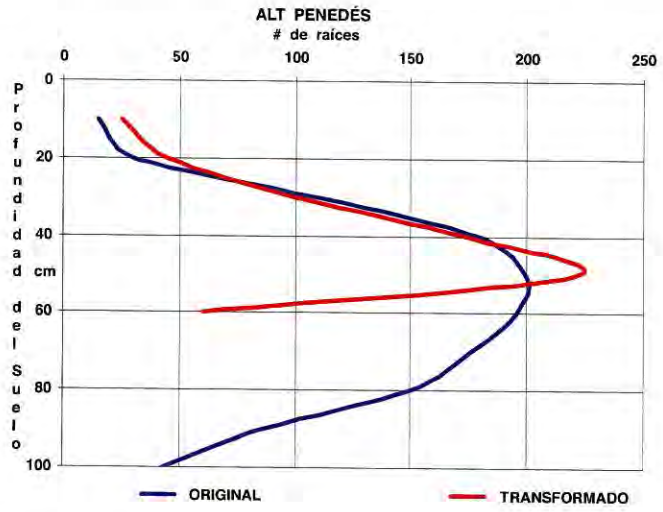


FIGURA 6. Distribución de las raíces de la viña en un suelo original y en un suelo transformado (decapitado por nivelación) en el Alt Penedès (Método de la trinchera, Nacci 2001). Fuente: autores.

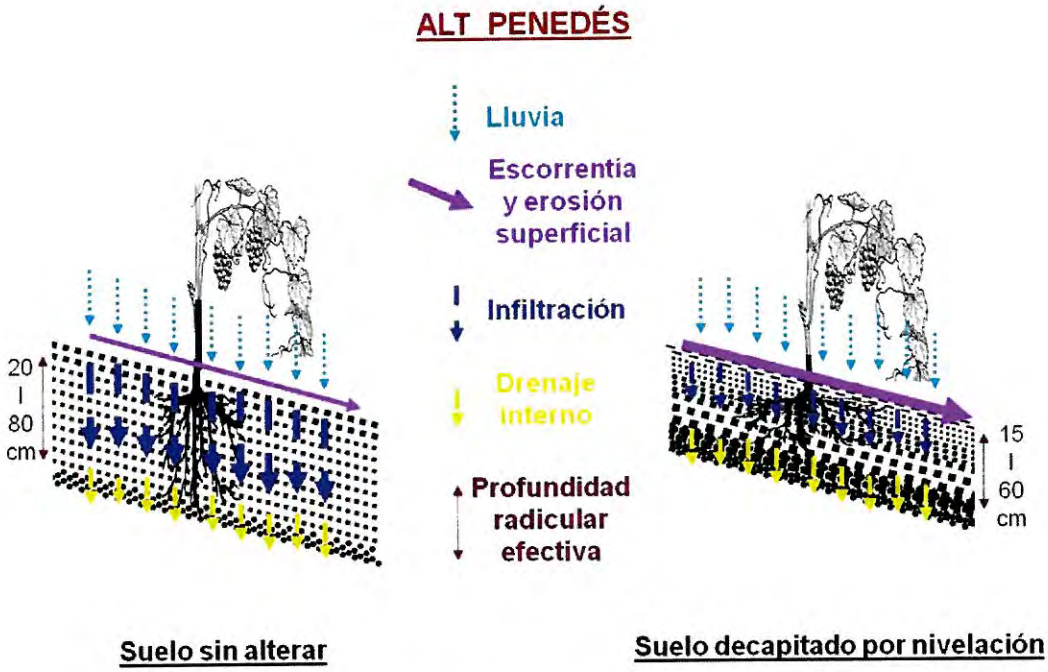


FIGURA 7. Desarrollo radicular y componentes del balance hídrico en suelo sin alterar (original) y decapitado por nivelación (transformado). Fuente: autores.

Los datos de las diferentes zonas experimentales se integraron con el modelo de balance hídrico SOMORE (Pla, 1997), para predecir los requerimientos hídricos de la vid y del cultivo de cobertura durante los diferentes periodos aproximados de desarrollo de la vid (con diferencias dependiendo del año, región y variedad) para producción de vino:

— Reposo (Octubre-Febrero)

— Brotación-Floración (Marzo-Abril)

— Floración-Envero (Mayo-Julio)

— Envero-Cosecha-Caída de hojas (Agosto-Septiembre)

FIGURA 8. Superficie del suelo transformado antes y después de una tormenta (efecto de sellado superficial) y uso de diferentes coberturas vivas para proteger el suelo superficial en viñas de secano del Alt Penedès. Fuente: autores.

Los valores utilizados para requerimientos de agua de la vid estuvieron dentro del rango de los correspondientes a un clima Mediterráneo semiárido (Nacci, 2001). Los requerimientos de agua para el cultivo de cobertura son los correspondientes a un cultivo bien desarrollado de cebada (figura 8).

4.5.3. Resultados y conclusiones

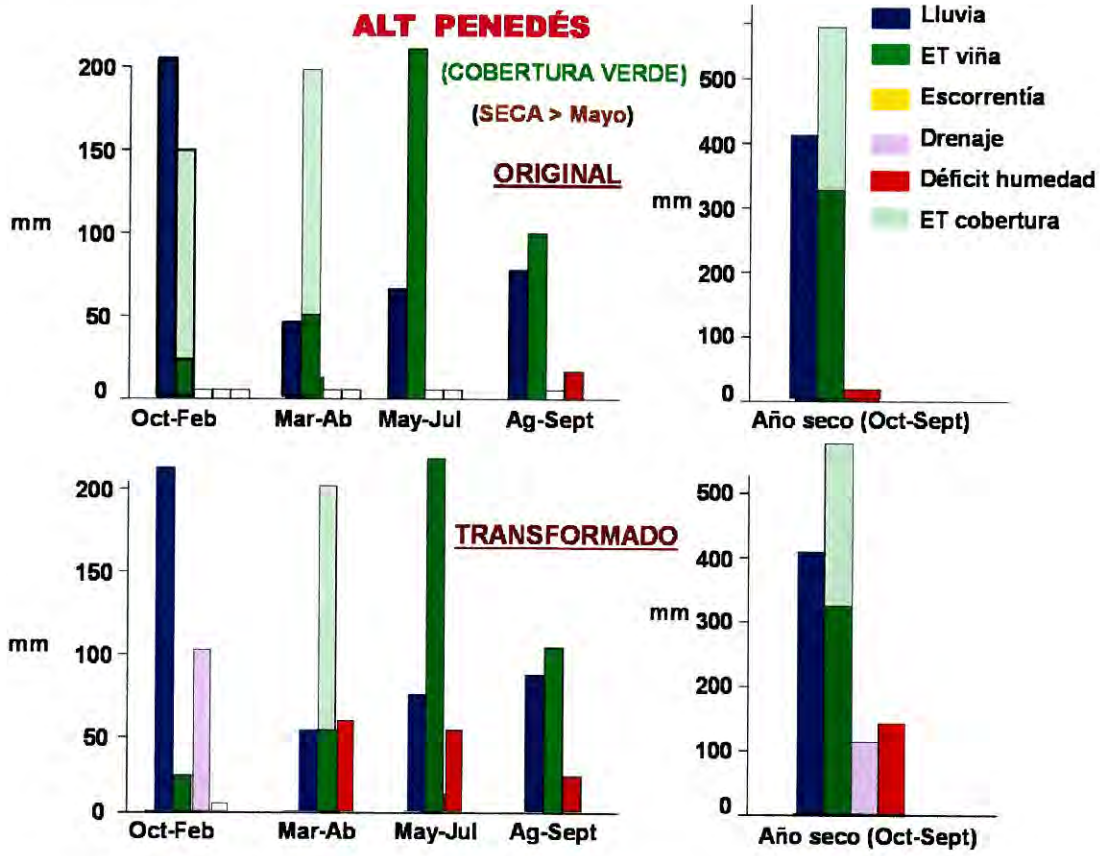


FIGURA 9. Distribución de las lluvias y de los diferentes componentes del balance hídrico en tierras originales y transformadas del Alt Penedès, con viña de secano (variedad Chardonay), con y sin el uso de cobertura verde (cortada o seca a partir de mayo) en los diferentes periodos de crecimiento de la viña y en todo el ciclo, en un año relativamente seco (periodo de retorno de 5 años). Fuente: autores.

Las figuras 9 y 10 muestran los valores de los componentes del balance de agua en el suelo calculados durante los diferentes periodos de desarrollo de la vid para producción de vino, en los dos años (seco y lluvioso) seleccionados, bajo condiciones variables de acondicionamiento previo del terreno (original y transformado), con y sin cobertura. Aunque la cobertura mejora la infiltración del agua de lluvia, reduciendo al mínimo las pérdidas de agua por escorrentía, y, por ende, la erosión, se deduce que, en todos los casos, la única posibilidad de poder colocar un cultivo de cobertura entre las hileras de la vid es durante el periodo de reposo. Si la cobertura se quiere mantener el resto del año hay que cortarla o secarla con un herbicida selectivo que no sea tóxico para la vid. Es evidente que el uso de un cultivo de cobertura en el periodo de reposo aumentaría las posibilidades de sequía en el periodo crítico de floración-envero en los años más secos; en especial en suelos con baja capacidad de retención de humedad (asociado a las características de los suelos y a la profundidad efectiva de las raíces), en el suelo transformado y en condiciones (clima, variedad, densidad de siembra) de mayores requerimientos de agua para la vid. Se concluye que en el suelo transformado, con menor profundidad efectiva de raíces, aún mejorando la infiltración

del agua de lluvia con el uso de coberturas, o mejorando las condiciones físicas del suelo superficial con el uso de enmiendas orgánicas (una práctica utilizada frecuentemente en la zona), no se resolvería el problema de riesgos de sequía en años secos e, incluso, en años más lluviosos con mala distribución de las lluvias, pues el exceso de agua de lluvia infiltrada se perdería por drenaje interno.

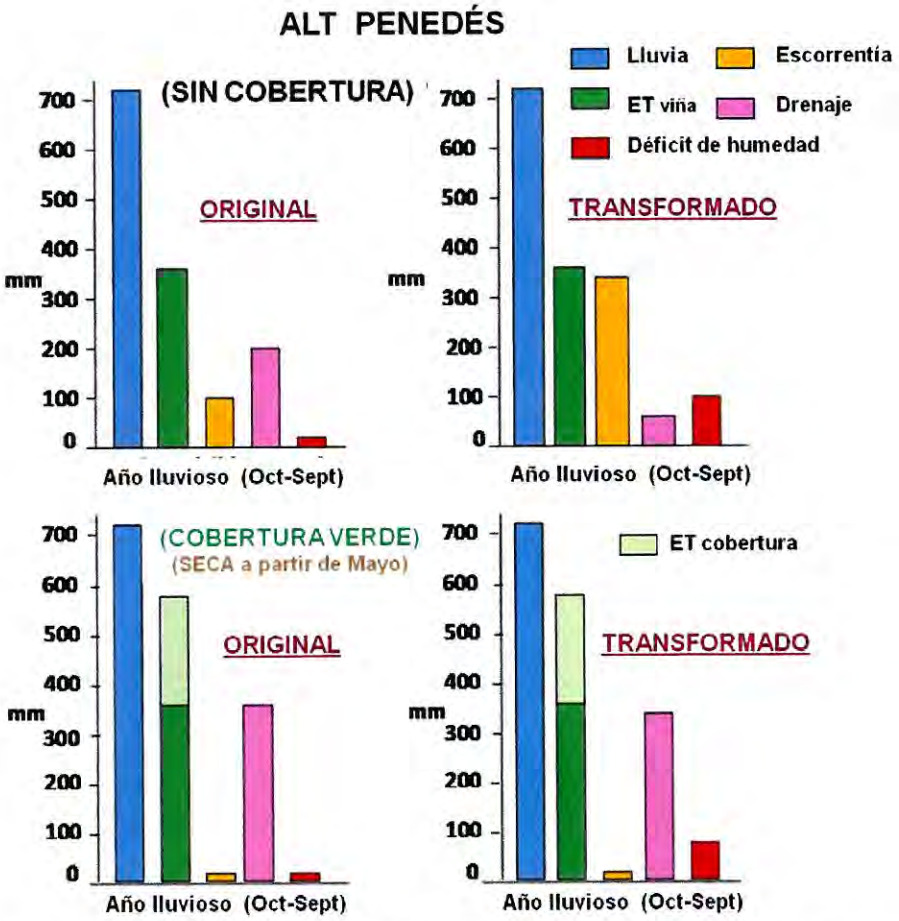


FIGURA 10. Balances hídricos en suelo original y transformado en tierras con viña del Alt Penedès, con y sin cobertura, en un año relativamente lluvioso (periodo de retorno de 5 años). Fuente: autores.

En general se puede concluir que las nuevas prácticas completamente mecanizadas, que exigen nuevas prácticas de manejo de tierras y del cultivo y un acondicionamiento previo de los terrenos a través de nivelaciones en el Alt Penedès, resultan en cambios drásticos en el régimen de humedad del suelo (Pla y col. 2005). Los mayores efectos son sobre la generación de escorrentía y erosión superficial, y en la reducción de la retención de agua de lluvia en el suelo para su utilización por la vid, lo cual resulta en efectos sobre la cantidad y calidad de la producción de uva y vino. En tres años (con total de lluvia cercana, pero por debajo del promedio, y con grandes diferencias en su distribución) de continuo monitoreo a nivel de campo, la producción de uva en la zona no transformada (original) osciló entre 12,5 y 16,4 Mg/ha, mientras que en la zona transformada varió de 5,2 a 7,1 Mg/ha, estando mucho más afectada por las diferencias en la cantidad y distribución de las lluvias (figura 11). La solución de estos problemas requeriría de prácticas adicionales para tratar de contrarrestar dichos efectos, como el uso de cultivos de cobertura o mejora de las condiciones físicas del suelo superficial con enmiendas, generalmente orgánicas. En algunos casos la efectividad de dichas medidas es limitada, al menos a corto plazo.

FIGURA 11. Efectos de la transformación de tierras sobre la erosión superficial y producción en viñas del Alt Penedès, derivados de cambios en el balance hídrico. Fuente: autores.

En cualquier caso se demuestra que un análisis basado en evaluaciones apropiadas, *in situ*, de las características del clima y de las propiedades y procesos hidrológicos, complementados con el uso de modelos sencillos de simulación de los balances hídricos, puede ser muy útil, e incluso indispensable, para una adecuada planificación de un uso y manejo más sostenibles de las tierras para producción de uvas para vino, o para otros usos alternativos (Pla, 2002; Pla *et al.,* 2005). Los estudios e investigaciones aquí reportadas abarcaron diferentes escenarios previstos de cambios de clima y políticas agrícolas que posiblemente estén asociados a cambios futuros en el uso y manejo de las tierras en la región mediterránea.

4.5.4. Referencias bibliográficas

MAIGRE, D., J. AERNY y F. MURUSIER. 1995. Entretien des sols vitícoles et qualité des vins de Chasselas : influence de l'enherbement permanent et de la fumure azotée. Revue Suisse Vitic. Arboric. Hortic. 27: 237-251

NACCI, S. 2001. Alteraciones en el Régimen Hídrico del Suelo Asociadas a la Sistematización y Cambios en el Manejo de Tierras con Viña de Secano en el Anoia-Alt Penedés. Tesis Dr. 141p. Universitat de Lleida. Lleida (España)

NACCI, S., C. RAMOS y I, PLA. 2002. Dynamics of the soil physical properties in vineyards highly mechanized of the Anoia- Alt Penedes. Region. (Catalunya, Spain). En: Man and Soil at the Third Millenium. (J.L.Rubio y col. Ed.). II:1615-1624. Geoforma Ed. Logroño.(España).

PLA, I. 1997. A soil water balance model for monitoring soil erosion processes and effects on steep lands in the tropics. En: Soil Erosion Processes on Steep Lands. Special Issue of Soil Technology. (I. Pla, ed).11(1):17-30. Elsevier. Amsterdam (Holanda)

PLA, I. 1998. Modeling hydrological processes for guiding soil and water conservation practices. En: A. Rodríguez y col (ed.) The Soil as a Strategic Resource: Degradation Processes and Conservation Measures. p. 385-412. Geoforma Ed. Logroño (España)

PLA, I. 2002. Hydrological approach to soil and water conservation. En: Man and Soil at the Third Millenium. (J.L. Rubio y col, ed.). I: 65-87. Geoforma Ed. Logroño (España).

PLA, I. y S. NACCI. 2001.Impacts of mechanization on surface erosion and mass movements in vineyards of the Anoia-Alt Penedés. Area (Catalonia, Spain). En: Sustaining the Global Farm. (D.E.Scott y col. ed.).p. 812-816. Purdue Univ.-USDA, ARS. West Lafayette, In.(USA)

PLA, I. y S. NACCI. 2003. Tradicional compared to new systems for land management in vineyards of Catalonia (Spain). En: Techniques Traditionnelles de GCES en milieu mèditerranien. (E. Roose y col. Ed.). Bulletin Reseau Erosion 21:213-223. Montpellier (Francia)

PLA, I., RAMOS, M.C., NACCI, S., FONSECA, F. y ABREU, X., 2005. Soil-moisture regime in vineyards of Catalunya (Spain) as influenced by climate, soil and land management. p. 41-49. En J. Benitez, y F Pisante (ed.). Integrated Soil and Water Management for Orchard Development. Land and Water Bulletin 10. FAO. Rome. (Italia)

RUPP, D. y R. FOX. 1999. Optimized water and nitrogen supply by adapted soil management in the Württemberg Vineyard region. Acta Horticultura Nº 493: 83-85

5.1. Investigación y recuperación de suelos y acuíferos contaminados: el caso de Hightex en Òdena

Massimo Marchesi, Jordi Palau, Carme Audí, Neus Otero y Albert Soler[1]

(1) Dept. Cristal·lografia, Mineralogia i Dipòsits Minerals, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona, Martí i Franquès, s/n. 08028 Barcelona.

Resumen

Los disolventes clorados forman parte de los contaminantes orgánicos encontrados con mayor frecuencia en los suelos y en las aguas subterráneas debido, en parte, a su potencial para llegar con facilidad al acuífero y contaminar grandes volúmenes de agua. El propósito de esta visita es presentar las actividades llevadas a cabo para la investigación y recuperación de un emplazamiento contaminado, sito en Òdena (localidad próxima a Igualada, NE de España).

A continuación se describen las características del emplazamiento, así como la naturaleza de su contaminación y alcance. Posteriormente, se presentan los resultados correspondientes a cada una de las siguientes etapas de estudio efectuadas para su investigación:

a) sistema de muestreo (mediante pozos multinivel) y metodología para caracterizar la contaminación

b) estudio de la relación suelo-acuífero con el propósito de determinar el papel de la contaminación en la zona no saturada (ZNS) y evaluar si ésta actúa como fuente continúa de contaminación en el acuífero

c) utilidad del análisis isotópico ($\delta^{13}C$) como trazador del origen de la contaminación, y para una mejor caracterización y cuantificación de los procesos de atenuación natural

d) potencialidad de la hidrólisis alcalina como tecnología pasiva para el tratamiento de descontaminación de compuestos orgánicos en aguas de lixiviación.

5.1.1. Descripción del emplazamiento contaminado

5.1.1.1. Situación y origen de la contaminación

El emplazamiento piloto de Òdena está situado aproximadamente a 50 km al NO de Barcelona y 4 km al NO de Igualada (NE de España). El suelo y el agua subterránea están contaminados por varios tipos de compuestos orgánicos cuyo origen está relacionado con las actividades de una planta química (Hightex) construida en 1978 y activa hasta 1985. Durante este período la planta producía productos fitosanitarios y multitud de productos para la industria textil.

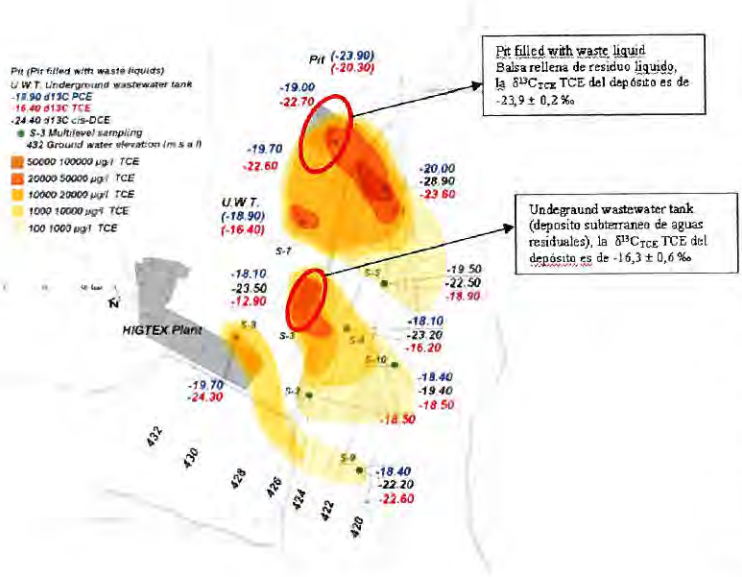


FIGURA 1. Penachos de contaminación por tricloroetileno (TCE) en el acuífero y valores $\delta^{13}C_{TCE}$ (‰) en el acuífero y fuentes de contaminación.

El emplazamiento exhibe una elevada complejidad debido a la presencia de múltiples fuentes de contaminación, entre las que destacan: un depósito subterráneo de agua residual y dos balsas llenas con residuos líquidos (figuras 1 y 2). El depósito subterráneo, con un volumen de 46 m^3, tenía su base a 2,9 m de profundidad. Las balsas, excavadas a unos 130 m al NNE de la planta en diferentes momentos, recibían efluentes residuales líquidos mediante una zanja excavada desde la planta, y, posteriormente, fueron rellenadas con arena y grava del entorno. El volumen estimado de una de ellas es de unos 684 m^3. Ni el depósito, ni las balsas disponían de ningún tipo de impermeabilización, lo que ocasionaba infiltración de aguas residuales y contaminantes hacia la ZNS.

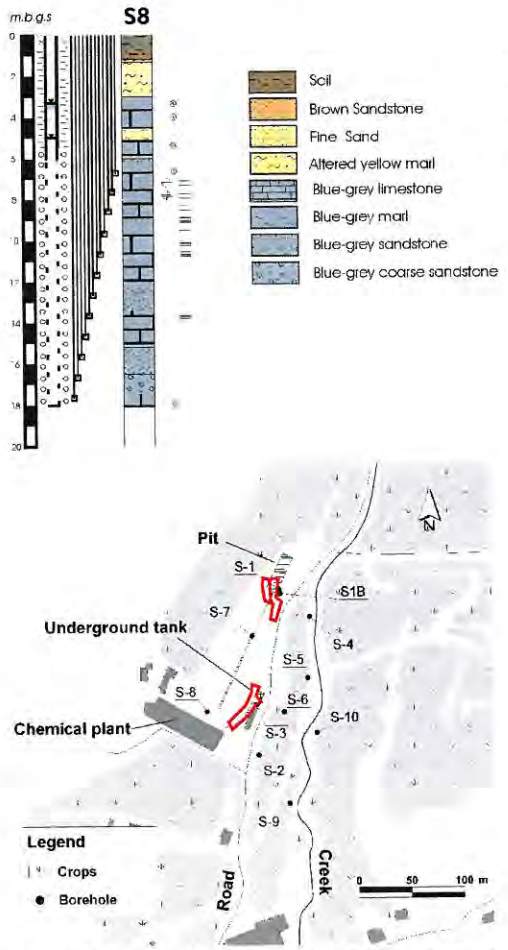


FIGURA 2 Superior: Sondeo multinivel S-8 con detalle de la columna estratigráfica y las profundidades de muestreo. Inferior: Mapa de la zona, las zanjas construidas están señaladas en rojo.

5.1.1.2. Geología e hidrogeología.

Para la caracterización del subsuelo, en 2005 se realizaron 10 sondeos con extracción de testigo continuo, S1-S10 (el S-8 se presenta en detalle en la figura 2), y profundidades entre 15 y 18 m (ARC, 2007). En ellos es posible diferenciar dos partes, la inferior, con techo irregular buzando hacia el SE, corresponde al sustrato rocoso formado mayoritariamente por una caliza azul-grisácea alternando con margas y niveles de arenisca del mismo color (figura 3). Este sustrato se encuentra a una profundidad comprendida entre 2,2 y 6,0 m y está cubierto por capas de marga amarilla alterada y arenisca marrón en la base, a la que se superponen depósitos cuaternarios de arena y limo, y a éstos el suelo o materiales antrópicos. La capa de arena limosa se encuentra en los sondeos S7, S5, S9 y S10, siendo su espesor creciente, hasta 3,4 m, al SE del área de estudio. El suelo presenta un espesor de hasta 2 m siendo reemplazado por un relleno antrópico de arena y grava con matriz arcillosa en los sondeos S3 y S7.

5.1.1.3. Contaminantes

La tabla 1 muestra una recopilación de los resultados indicados en estudios precedentes, realizados por *l'Agència de Residus de Catalunya* (ARC, 2001 y ARC, 2007), sobre los contaminantes encontrados en mayor concentración en la ZNS. Estos valores proceden de muestras tomadas con anterioridad a las tareas de des-contaminación del suelo llevadas a cabo durante el año 2005 (ARC, 2007). Es preciso destacar que los compuestos orgánicos volátiles clorados (COVs-Cl) solamente se encontraron en el sondeo situado al lado del depósito subterráneo (S3, figura 1).

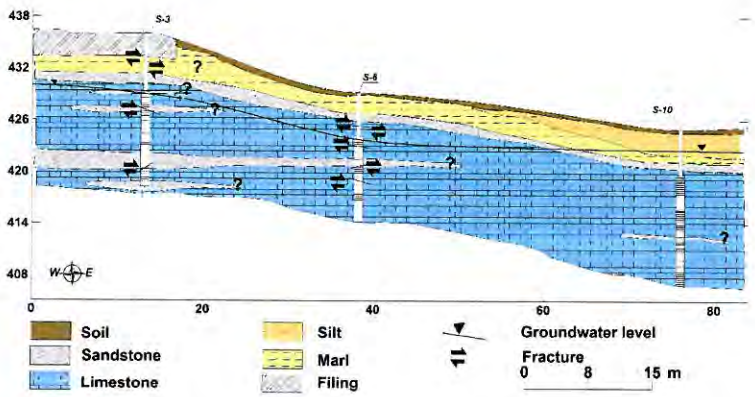


FIGURA 3. Corte hidrogeológico realizado a partir de los sondeos S-3, S-6 y S-10.

TABLA 1. Principales contaminantes orgánicos de la ZNS. Compuestos orgánicos semivolátiles (COSVs) y compuestos orgánicos volátiles (COVs)

COSVs (mg/kg)	**ARC, 2001**	**ARC, 2007**
Metoxicloro	880	1600
o,p-Metoxicloro	770	
Tetradifon		880
Molinato		44
COVs (mg/kg)		
Metoxibenceno	45	66
TCE	32	24
CF	15	88
Etilbenceno		66
Tolueno		56
DCM		18
PCE		200
CT		200
1,4-DCB		140
1,2-DCB		43
1,2,4-TCB		170

En las aguas subterráneas se han podido identificar diferentes contaminantes:

— COVs-Cl: percloroetileno (PCE), tricloroetileno (TCE), diclororetileno (cis-DCE) y cloruro de vinilo, compuestos halogenados del metano y otros compuestos detectados en concentraciones inferiores;
— COVs no halogenados: metoxibenzeno, tolueno, etilbenzeno, y m-, o-, y p-xileno;
— COSVs: pesticidas y herbicidas: molinato y metoxicloro.

Los compuestos orgánicos volátiles (contaminantes principales), especialmente los halogenados, llegan a presentar concentraciones de hasta 50 mg/l, mientras que los otros compuestos (contaminantes secundarios) se hallan casi todos en concentraciones por debajo de 1 mg/l (Palau *et al.*, 2007a).

5.1.2. Metodología

5.1.2.1. Muestreo

Las muestras de agua del acuífero se tomaron mediante un sistema de toma multinivel (figura 4) que se instaló en la misma red de puntos donde se colocaron los pozos de control ambiental. A diferencia de los pozos, cuyas muestras corresponden a una mezcla del agua que fluye a distintas profundidades debido a que su rejilla tiene entre 10 y 12 m de longitud, las muestras tomadas con el dispositivo multinivel pretenden ser representativas del agua que fluye a una determinada profundidad. El propósito de este muestreo discreto era observar la distribución vertical del contaminante en el acuífero. Para ello, cada punto de toma de muestra multinivel constaba de una serie de tubos de Teflon® de pequeño diámetro (5 mm Ø externo) y de longitud variable en función de la profundidad de muestreo. Se han utilizado diferentes configuraciones de espaciado vertical (0,5 m, 1,0 m y 2,0 m) dependiendo de la distancia del punto al foco de contaminación, permitiendo obtener hasta 25 muestras en los puntos más alejados (Palau, 2008).

FIGURA 4. Toma de muestras y determinaciones *in situ* de algunos parámetros geoquímicos.

El volumen de muestra extraído se minimizó al máximo para evitar interferencias entre los diferentes tubos. El purgado de los tubos se realizó con jeringas estériles de 60 ml. Una vez purgado el tubo y previamente a la toma de muestra, se determinaron en campo: pH, Eh, y oxigeno disuelto (mediante oxímetro), utilizando una celda de flujo diseñada para pequeños volúmenes de muestra. Acoplando un filtro Milipore® de 0,45µm a la jeringa se extrajo el volumen de agua necesario para determinar cada uno de los siguientes parámetros:

— 20 ml, medición, en campo, del oxigeno disuelto (DO), mediante un espectrofotómetro portátil.

— 30 ml, determinación, en laboratorio, del carbono orgánico disuelto (DOC).

— 125 ml, determinación de cationes y aniones mayoritarios.

Finalmente, sin el filtro, se recogieron 125 ml y se trasvasaron a una botella de vidrio ámbar para la determinación, en el laboratorio, de la concentración y la composición isotópica de los compuestos orgánicos disueltos. Las muestras se mantuvieron refrigeradas a 4°C para su transporte al laboratorio.

En las muestras de agua, el análisis de la concentración de COVs se realizó por cromatografía de gases–masas (GC-MS). Para el análisis isotópico del carbono de algunos contaminantes (PCE, TCE y cis-DCE) se utilizó un cromatógrafo de gases acoplado, en flujo continuo, a un espectrómetro de masas de relación isotópica (GC-IRMS), que permite conocer la composición isotópica de cada compuesto presente en la muestra (Palau, 2007b). El resultado del análisis isotópico se expresa mediante la notación $\delta^{13}C$ (‰), definida como $\delta^{13}C$ =

$((R_s/R_r)-1) \times 1000$, donde R_s y R_r son los ratios $^{13}C/^{12}C$ de la muestra y el patrón internacional, respectivamente. Para el carbono, el patrón utilizado es el Vienna PeeDee Belemnite (VPDB). Ambos análisis se realizaron en los *Serveis Cientificotècnics de la Universitat de Barcelona*.

5.1.2.2. Aplicaciones de los isótopos

La fuerza de enlace covalente de un determinado elemento es función de su masa, por este motivo la velocidad de reacción para las moléculas que contienen los isótopos más ligeros es ligeramente mayor que la de las moléculas que contienen los isótopos más pesados. Así, el producto de las reacciones tiende a enriquecerse en isótopos ligeros, mientras que los reactantes se enriquecen en los isótopos más pesados. Esta diferencia da lugar a efectos cinéticos isotópicos significativos (fraccionamiento isotópico) que permiten identificar el tipo de proceso, e incluso cuantificarlo (Clark *et al.*, 1997).

En la figura 5 se observa como durante los procesos de biodegradación, el fraccionamiento asociado a la degradación del compuesto da lugar a que los valores de $\delta^{13}C$ del compuesto degradado sean cada vez más enriquecidos (Meckenstock *et al.*, 2004). La composición isotópica de los contaminantes estudiados no se modifica por procesos de dilución, sorción, ni transporte; solamente variará por reacciones de degradación (por ejemplo, biodegradación), por ello aplicando la ecuación derivada (1) de la ecuación de destilación de Rayleigh (Clark y Fritz, 1997), se puede determinar el porcentaje de compuesto biodegradado (B):

$$B = 100 \times [1-(\delta^{13}C_t + 1000)/(\delta^{13}C_0 + 1000)^{1000/\varepsilon}] \text{(Ecuación 1)}$$

Donde ε es el factor de enriquecimiento (fraccionamiento isotópico), $\delta^{13}C_t$ la composición isotópica en el tiempo t y $\delta^{13}C_0$ la composición isotópica inicial (figura 5).

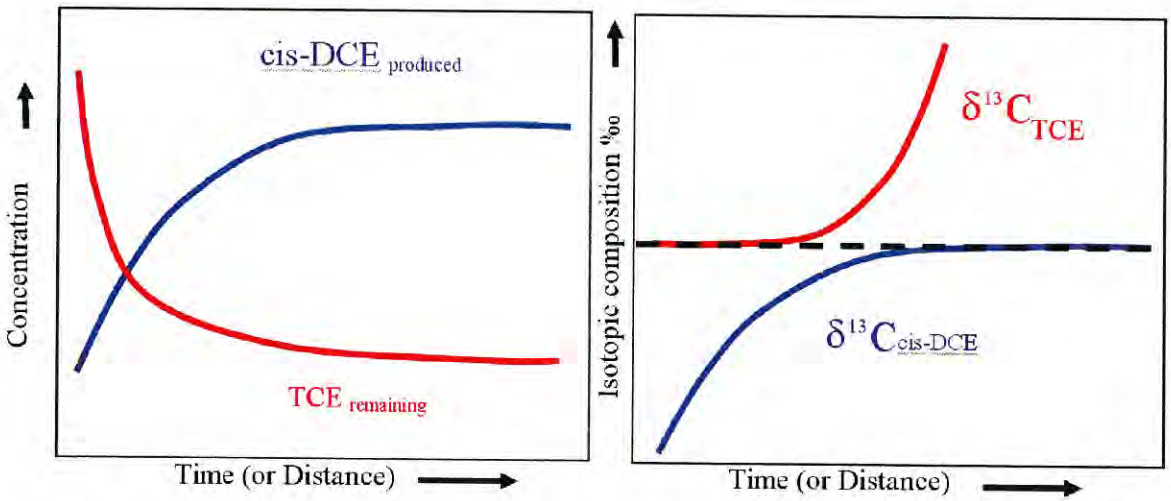


FIGURA 5. Variación de concentración y composición isotópica del TCE y de su producto de degradación, cis-DCE).

La geoquímica isotópica tiene además otras aplicaciones. Así, permite diferenciar compuestos químicos idénticos en cuanto a su formulación, pero que isotópicamente no tienen porque ser iguales. Por ello, a menudo se utiliza para determinar el origen de la contaminación y por tanto la responsabilidad en problemas ambientales.

5.1.3. Caracterización de la contaminación

5.1.3.1. Distribución vertical de COVs en la ZNS y COVs-Cl en el acuífero

La figura 6, muestra el resultado de las mediciones de COVs totales en los testigos de sondeo (ARC, 2007) junto con la concentración de COVs-Cl (sumatorio de PCE, TCE, 1,2-cis-DCE, CT, CF y DCM) en el acuífero. Los disolventes clorados son los contaminantes mayoritarios encontrados en el acuífero. Debido al valor del coeficiente de partición agua / carbono orgánico (K_{oc}) de los COVs-Cl estudiados, 439 y 9 ml/g para el CT y el DCM respectivamente (Pankow y Cherry, 1996), en episodios de lluvia, una cantidad significativa de contaminante puede ser desorbida y transportada al acuífero por el agua de infiltración. Los puntos de muestreo situados en la zona de la balsa y de los depósitos S1 y S3, exhibieron concentraciones de COVs en la ZNS muy superiores a las de los COVs-Cl del acuífero, en comparación con aquellos puntos situados inmediatamente aguas abajo, S4 y S6 (figuras 6 y 1).

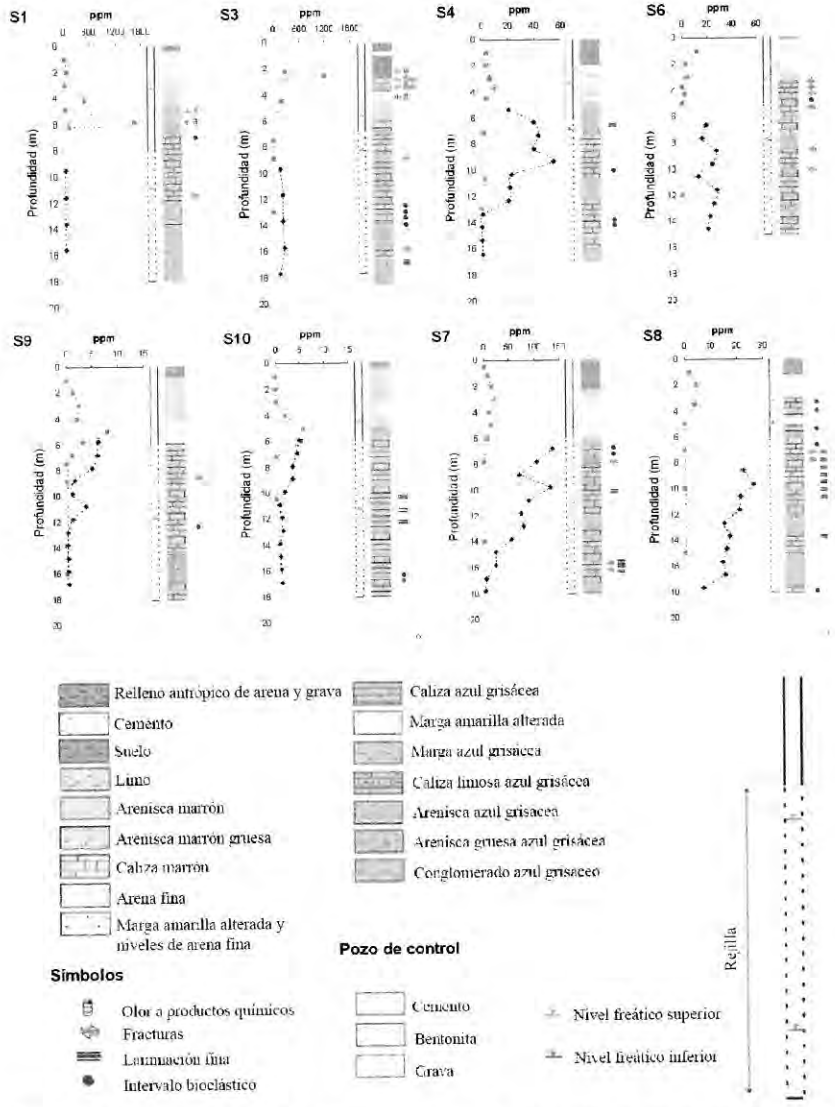


FIGURA 6. Perfiles de los COVs (■) y COVs-Cl (♦) junto con las columnas litoestratigráficas y la variación del nivel freático. Nota: En la leyenda, los materiales de la izquierda corresponden a los de la parte superior y los de la derecha a los estratos inferiores.

La elevada concentración de COVs total en S1 y S3 (> 1000 ppm en algunas muestras) sugiere que en episodios de lluvia, alrededor de estos puntos, puede producirse una entrada de contaminantes al acuífero. Este hecho viene corroborado por la elevada concentración de COVs-Cl en las partes del acuífero donde se sitúan los sondeos S1 (> 10 mg/l de TCE) y S3 (> 20 mg/l de TCE). Los perfiles verticales de concentración de COVs-Cl en el acuífero muestran que los valores más altos se obtuvieron en la parte superior, indicando que el contaminante puede haber emanando desde la ZNS. Contrariamente a S1 y S3, en los puntos S4 y S6 la concentración de COVs-Cl en el acuífero fue superior a la concentración de COVs de la ZNS. Según esta interpretación, los COVs medidos en los testigos de sondeo probablemente provienen del agua subterránea. Este origen es consistente con el hecho que las mayores concentraciones de COVs se midieron en los testigos situados por debajo del nivel freático (figura 6).

Los perfiles verticales de concentración de contaminante en la ZNS y el acuífero han permitido entender mejor el efecto de la contaminación en la ZNS sobre el acuífero en diferentes partes del emplazamiento. Se han observado algunas áreas donde la ZNS actúa como fuente contaminante en comparación a otras donde la contaminación proviene principalmente del transporte a través del acuífero. Los datos isotópicos han permitido relacionar la contaminación en el acuífero con las distintas fuentes y determinar aproximadamente su alcance, mostrando ser una herramienta muy efectiva en emplazamientos con acuíferos fracturados y varios focos de contaminación.

5.1.3.2. Relación entre fuentes y contaminante presente en el acuífero. Aplicación de la composición isotópica del TCE

Para la caracterización isotópica de las fuentes, se tomaron muestras de agua residual del depósito subterráneo, previamente a su eliminación en 2005, y de una fractura que se interceptó en la zona de las balsas a 5,8 m de profundidad. El agua que fluía por la fractura se interpretó como agua de infiltración superficial, dado que en ese momento ésta se encontraba por encima del nivel freático (figuras 1 y 7). En ese caso, la muestra de agua de la fractura representaría el contaminante lixiviado de la ZNS. La $\delta^{13}C_{TCE}$ del depósito se midió en tres ocasiones (entre octubre del 2002 y septiembre del 2004), no encontrando variaciones significativas. El valor promedio para el TCE del depósito es de -16,3 ± 0,6 ‰ mientras que el valor encontrado en la muestra de la fractura es de -23,9 ± 0,2 ‰. Esta diferencia entre ambas fuentes nos permite determinar su origen en el acuífero. Así, en la figura 1 se observa que los valores $\delta^{13}C_{TCE}$ determinados en los puntos S3, S6 y S10 se asemejan al valor obtenido en el depósito y que los valores de los puntos S1 y S4 son similares a los de la muestra procedente de la fractura.

5.1.4. Atenuación natural monitorizada

5.1.4.1. Condiciones redox

En el foco de contaminación situado en el piezómetro S-3 (corte S-3, S-6 y S-10, ver figuras 7 y 1), la disminución de las concentraciones de nitratos, sulfatos y oxígeno disuelto (DO), va acompañada por un aumento del carbono inorgánico disuelto (básicamente HCO_3), ello indica que se dan condiciones favorables para la existencia de procesos de biodegradación reductiva. Al contrario, en el piezómetro S-6, la presencia de nitratos (y de sulfatos en concentraciones muy elevadas) excluye su existencia, aunque los valores del carbono orgánico disuelto (DOC) y HCO_3^- parecen indicar la presencia de actividad bacteriana. Finalmente, en el piezómetro S-10 las condiciones geoquímicas no indican ningún tipo de actividad bacteriana (figura 7). Las concentraciones elevadas de cis-DCE encontradas en la zona próxima a los piezómetros S-3 (hasta 12 mg/l) y S-6 podrían ser debidas también a la existencia de procesos de biodegradación, mientras que en el piezómetro S-10 podrían ser debidas solo a procesos de transporte. La caracterización de las variables

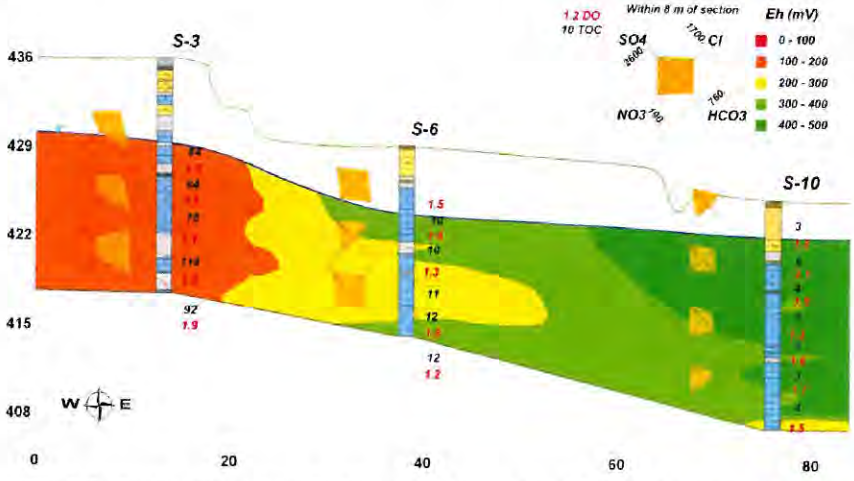


FIGURA 7. Parámetros geoquímicos: Eh, DO (mg/l), DOC (mg/l), HCO^{3-} (mg/l), SO_4^{2-}(µg/l), NO^{3-} (µg/l), Cl^- (µg/l) en el corte: S-3, S-6, S-10).

geoquímicas de los distintos piezómetros, ha permitido poner de manifiesto que las zonas más favorables para la existencia de biodegradación son las más cercanas a los focos contaminación (próximas al piezómetro S-3, por ejemplo).

5.1.4.2. Cuantificación de los procesos de biodegradación a partir de la composición isotópica

Cuando tienen lugar procesos de biodegradación, el fraccionamiento asociado a la degradación de un compuesto da lugar a que los valores $\delta^{13}C$ del compuesto degradado estén cada vez más enriquecidos en el isótopo pesado (Meckenstock *et al.*, 2004). En este emplazamiento, se determinó la $\delta^{13}C$ del TCE ($\delta^{13}C_{TCE}$) en aquellas zonas que presentaban condiciones favorables a la existencia de procesos de biodegradación. Con estos análisis se pretendía confirmar la existencia de dichos procesos en la zona de estudio, especialmente aguas abajo de las zonas donde se detectaron concentraciones elevadas de productos de degradación (cis-DCE), dado que su presencia a lo largo de la pluma de contaminación podría deberse únicamente a procesos de transporte.

En la pluma de contaminación S-3, S-6 y S-10 (figura 8), la $\delta^{13}C$ del TCE presenta valores más elevados con respeto a la fuente. En la zona más profunda del piezómetro S-3, el valor de la $\delta^{13}C_{TCE}$ (-9,1 ‰) comparado con el de la fuente (-16,3 ‰) resulta ser muy superior. En el piezómetro S-8 (figura 8), el valor de $\delta^{13}C_{TCE}$ (-23,9 ‰) es todavía muy parecido al valor de la fuente (-23,9 ‰) indicando ausencia de procesos de degradación bacteriana (o que en caso de producirse, serían poco relevantes). Aguas abajo, en el piezómetro S-9 (figura 1), donde las condiciones geoquímicas son favorables (en profundidad) el valor de $\delta^{13}C_{TCE}$ (-21,8 ‰) confirma que se están dando procesos favorables a su biodegradación. Finalmente, los valores de $\delta^{13}C_{TCE}$ en las zonas más profundas del S-1 (-22,8 ‰) y del S-4 (-22,4 ‰), se mantienen muy parecidos a la composición inicial de la fuente (-23,9‰). Se explica de esta manera, porque la concentración de cis-DCE es más baja de lo esperado, ya que probablemente los procesos de biodegradación están afectando a otros compuestos distintos del TCE (Palau *et al.*, 2009).

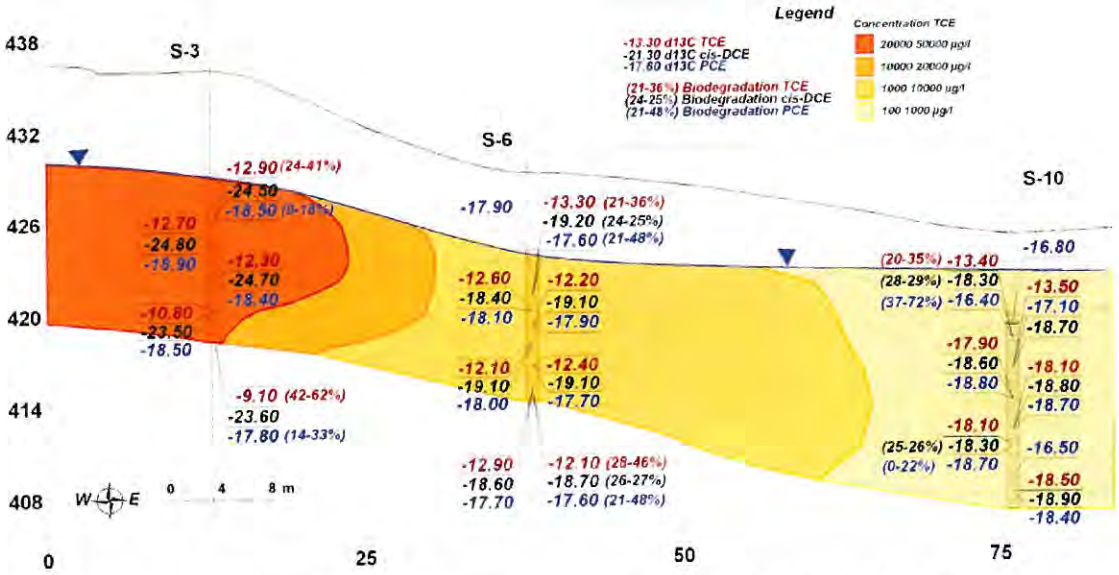


FIGURA 8. $\delta^{13}C$ (en ‰) de PCE, TCE y cis-DCE y porcentajes de biodegradación (Ec. 1) en el corte S-3, S-6, S-10).

Para estimar la cantidad de compuesto biodegradado en la pluma de contaminación S-3, S-6, S-10 (figura 8) se ha aplicado la ecuación de Rayleigh, (ecuación 1), utilizando valores bibliográficos para los coeficientes de enriquecimiento. En el caso del TCE se ha utilizado un valor mínimo de -7,1 ‰ y uno máximo de -18.2 ‰ (Meckenstock *et al.*, 2004). Asimismo, el valor de la composición isotópica inicial utilizado ha sido el correspondiente a la fuente ($\delta^{13}C$ de -

16,3 ‰). Los porcentajes de biodegradación obtenidos oscilan entre unos valores mínimos de 20 – 35% (en los sondeos S-6 y S-10) hasta valores de 42 - 62% (en la zona más profunda del piezómetro S-3).

5.1.5. Remediación: barreras de intersección de la recarga

5.1.5.1. Zanjas de intercepción

Con el objetivo de elaborar un buen modelo conceptual de la ZNS del emplazamiento de Òdena, se realizaron 3 zanjas de gran profundidad que permitirían estudiar la ubicación de los contaminantes en el suelo. La primera se situó encima de la antigua zona de vertido, con unas dimensiones de 14 m de largo, 2,5 m de ancho y entre 6,5 - 7 m de profundidad. Una fractura que se había identificado en el sondeo S-1 se interceptó en la zanja a 5,8 m respecto el nivel topográfico, presentando relleno de materiales finos (limos y arcillas) de color ocre con un elevado grado de contaminación (>3000 ppm de COVs). La segunda zanja se realizó a unos 20 m aguas arriba de la primera, en esta no se observaron indicios de contaminación, ni en el suelo ni en las aguas, así que se rellenó con los materiales excavados. La última zanja se realizó directamente encima de la cisterna subterránea y se prolongó siguiendo el trazado de la tubería del antiguo sistema de alcantarillado, con unas dimensiones finales de 28 m de largo, 2,5 m de ancho y entre 6,5 y 7 m de profundidad (ARC, 2007). En ésta se puso de manifiesto la existencia de volúmenes importantes de suelo contaminado por pérdidas de la red. Estos materiales contaminados fueron extraídos, enviados para su tratamiento y depositados en vertedero.

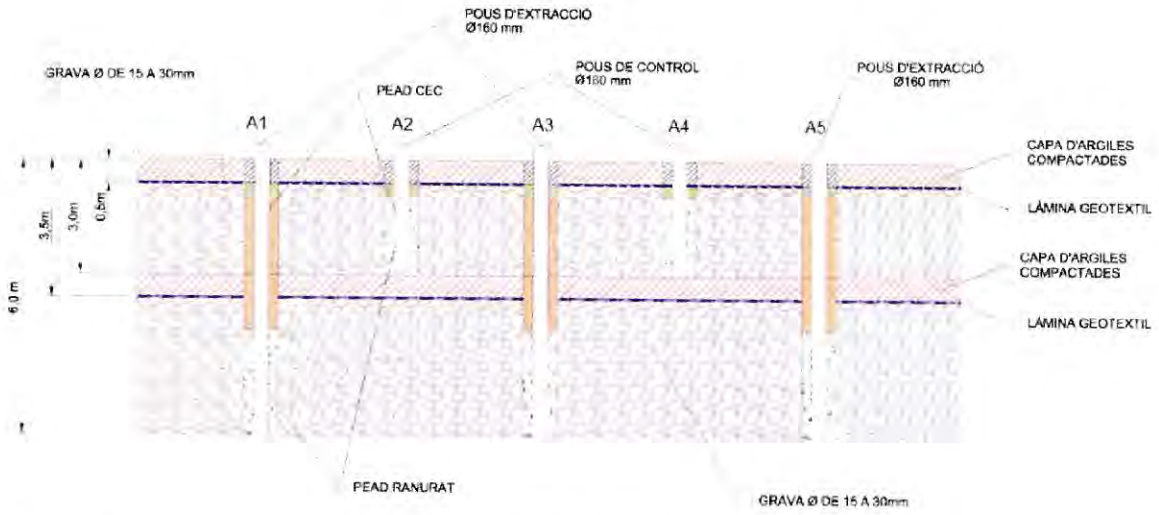


Figura 9. Esquema del acondicionamiento de las zanjas de gran profundidad (ARC, 2007).

Con el fin de interceptar las aguas de recarga con altas concentraciones de contaminantes orgánicos, las dos zanjas de intercepción se rellenaron con escombros urbanos inertes procedentes de la construcción (figura 9), constituidos principalmente por cemento Pórtland, fragmentos de cerámicas de construcción, yeso y áridos diversos. La composición mineralógica del cemento, suele estar representada principalmente por portlandita ($Ca(OH)_2$), entre otras fases como alita, belita, langbeinita, aphthitalita. La portlandita es un hidróxido alcalino que en contacto con agua se disuelve y el equilibrio portlandita – agua comporta la basificación de la solución. Por este motivo el agua recogida en las zanjas tiene pH alcalino, de 12, valor muy superior al valor en condiciones naturales de las aguas subterráneas de la zona, las cuales presentan un pH promedio de 7,6. Como las zanjas no están impermeabilizadas en su base, ni en los laterales es de esperar que parte de las aguas de las zanjas se reintroduzcan en el acuífero.

5.1.5.2. Experimentos de hidrólisis alcalina

El estudio y experimentación por parte del grupo de Mineralogía Aplicada y Medio Ambiente, del *Departament de Cristal·lografia, Mineralogia i Dipòsits Minerals, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona*, con diversos tratamientos de oxidación química avanzada sobre aguas contaminadas y la consiguiente observación del efecto provocado por la aplicación de pH alcalino como activador de la oxidación por persulfato de, concretamente, tricloroetano (TCA), condujo al estudio en profundidad de la hidrólisis alcalina, en particular, la inducida por materiales de escombros urbanos inertes constituidos en su mayoría por portlandita.

Se estudió, mediante experimentos en *batch*, el efecto de reducción de la concentración de cloroformo (CF), PCE, TCE, tolueno, TCA y cis-DCE asociado a la hidrólisis alcalina producida a partir de hormigón triturado, cemento en polvo e hidróxido de calcio. El hormigón triturado pretendía simular el efecto de los escombros urbanos inertes; el cemento en polvo y el hidróxido de calcio pretendían obtener resultados únicamente debidos a la hidrólisis alcalina, sin los posibles efectos de adsorción a las partículas sólidas que se podrían producir en el caso del hormigón. Los resultados obtenidos (tabla 2) indican que el hormigón es responsable de la máxima reducción de contaminantes, evidenciando procesos de adsorción que se sumarían a los efectos reales de degradación. La contribución de la degradación a la reducción de la concentración, se observa en los resultados obtenidos por basificación con hidróxido de calcio o con cemento.

TABLA 2. Reducción de CF, TCE, PCE, tolueno, TCA y cis-DCE en el estudio de hidrólisis alcalina con hormigón, cemento e hidróxido de calcio.

Material	Compuesto	% Reducción en 28 días	pH a los 28 días
Hormigón (sólido triturado)	CF	95	12.6
	TCE	75	
	PCE	90	
	Tolueno	75	
	TCA	70	
	cis-DCE	64	
Cemento (polvo)	CF	78	12.4
	TCE	40	
	PCE	58	
	Tolueno	46	
	TCA	34	
	cis-DCE	31	
Medio basificado con CaOH	CF	85	12.5
	TCE	51	
	PCE	68	
	Tolueno	47	
	TCA	52	
	cis-DCE	32	

En el siguiente estudio se aplicó el análisis de los isótopos del carbono ($^{13}C/^{12}C$) como método para distinguir el efecto real de la degradación potencial producida por hidrólisis alcalina, respecto a otros posibles efectos no degradativos como adsorción en la fase sólida de los escombros o volatilización. La determinación de la composición isotópica debería permitir determinar la eficacia real del proceso de degradación a nivel de campo. En primer lugar se realizaron experimentos en *batch*, que permitieron la obtención de los valores de composición isotópica del CF en contacto con la portlandita a lo largo del tiempo, lo que permitiría conocer la presencia o ausencia de degradación. Mediante los resultados isotópicos también se pretendió obtener el factor de enriquecimiento isotópico, necesario para posteriormente hacer un seguimiento del mismo proceso en el campo, y poder determinar así su eficacia.

Posteriormente se realizó un estudio de la evolución temporal de la concentración y composición isotópica del CF en las zanjas de recuperación de las aguas de lixiviación, en las cuales, como ya se ha indicado, se habían vertido escombros urbanos de portlandita.

Tal como se observa en la figura 10, los resultados obtenidos en los experimentos de laboratorio muestran una reducción de la concentración de CF con el tiempo, llegando a desaparecer a los 21 días. Esta reducción es probablemente debida, en gran medida, a un efecto de degradación causado por la portlandita, el cual se hace evidente debido al considerable enriquecimiento en ^{13}C que se produce (189‰) a lo largo del experimento. Con los resultados obtenidos y a partir de la ecuación de Rayleigh se obtuvo un factor de enriquecimiento isotópico de -42,8‰.

De los resultados obtenidos del seguimiento de la zanja, se puede concluir, por un lado, que a lo largo del tiempo se produce una variación significativa de la concentración de CF que puede ser ocasionada por la lluvia, a veces causante de posibles diluciones y a veces del arrastre del contaminante retenido en el suelo hacia la zanja. Por otro lado, los resultados de la composición isotópica a lo largo del tiempo muestran que se ha producido un enriquecimiento de 10,9‰. Esta tendencia indica que independientemente de otros factores implicados se está produciendo una degradación del CF en la zanja, probablemente debido al elevado pH (12) inducido por la portlandita.

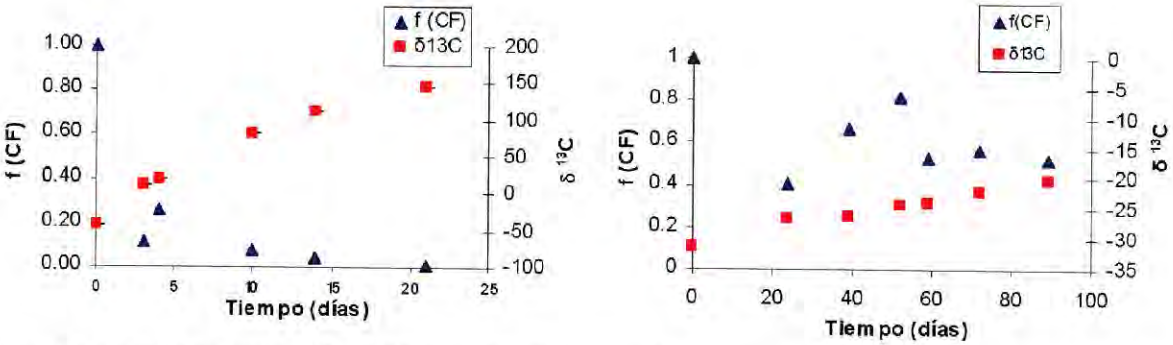


Figura 10. Resultados del experimento en batch (izquierda) y de campo, en la zanja (derecha): fracción remanente (▲) y composición isotópica $\delta^{13}C$ (■) del cloroformo a lo largo del tiempo.

Los resultados de este estudio indican que la hidrólisis alcalina producida por incorporación de portlandita puede ser un método eficaz para la degradación del CF y, además, que el análisis isotópico del ^{13}C permite discernir los efectos asociados a la degradación de otros procesos (adsorción o volatilización). Con el valor del coeficiente de enriquecimiento obtenido previamente en el laboratorio se puede cuantificar este proceso directamente en el campo.

5.1.6. Referencias bibliográficas

ARC (2001). Investigació subsòl de l'antiga planta HIGHTEX S.A., Òdena. Agència de Residus de Catalunya. Departament de Medi Ambient. Generalitat de Catalunya.

ARC (2007). Tasques de mostreig i gestió de sòls contaminats a les insta·lacions de l'antiga HIGHTEX al terme municipal Òdena. Agència de Residus de Catalunya. Departament de Medi Ambient. Generalitat de Catalunya.

CLARK, I.D., AND FRITZ, P. (1997): *Environmental Isotopes in Hydrogeology.* Lewis, Boca Raton, Florida, 55-57.

MECKENSTOCK, R.U., MORASH, B., GRIEBLER, C. AND RICHNOW, H.H. (2004). Stable isotope fractionation analysis as a toll to monitor biodegradation in contaminated aquifers. *Journal of contaminated aquifers*, 75, 215-255.

PALAU, J., MARCHESI, M., SOLER A., ARAVENA R., QUERALT, P., MARCUELLO A. (2007a). Site characterization of a fractured bedrock aquifer contaminated with dense non aqueous phase liquids in Catalonia, Spain. *Water Pollution in natural Porous media at different scales. Assessment of fate, impact and indicators. Wapo*^{2}, 211-219.

PALAU, J., SOLER, A., TEIXIDOR, P., ARAVENA, R. (2007b). Compound-specific carbon isotope analysis of volatile organic compounds in water using solid-phase microextraction. *J. Chromatogr. A*, 1163, 260-268.

PALAU, J., MARCHESI, M., OTERO N., CANALS A., SOLER A. (2009) Estudio de la relació suelo-acuífero en un emplazamiento contaminado por disolventes clorados. Estudios en la Zona No Saturada del Suelo. Vol IX. Eds.: Silva, O. y Carrera, J. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 546-553.

PALAU, J. (2008). Aplicación de la composición del carbono de compuestos orgánicos volátiles en acuíferos contaminados por disolventes clorados. Tesis doctoral. Directores: Soler, A. y Canals, A. Universitat de Barcelona. Facultat de Geologia. Dept. de Cristal·lografia, Mineralogia i Dipòsits Minerals, 232pp.

PANKOW, J.F Y CHERRY, J.A. (1996). Dense chlorinated solvents and other DNAPLs in groundwater. 1st ed. Portland, Oregon. Waterloo Press.

5.2. Rehabilitación de suelos en canteras de caliza: el caso de La Falconera (Garraf)

Josep M. Alcañiz[1,2], Vicenç Carabassa[1], Oriol Ortiz[1,2] y Esteve Serra[3]

(1) Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF), Edifici C, Campus UAB, 08193 Bellaterra (Cerdanyola del Vallès), Barcelona, España.
(2) Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), Dpto. Biología Animal, Biología Vegetal y Ecología, Facultad de Biociencias, Campus UAB, 08193 Bellaterra (Cerdanyola del Vallès), Barcelona, España.
(3) Àrea d'Avaluació i Restauració d'Activitats Extractives, Generalitat de Catalunya, 08029 Barcelona, España.

Resumen

Las zonas denudadas por actividades mineras en Cataluña ocupan unas 6.300 ha que corresponden a áreas en explotación, ocupadas por instalaciones o pendientes de restauración. Predominan las canteras de calizas y las extracciones de gravas siendo las primeras las de mayor dificultad de restauración. Las principales etapas de la restauración de estas canteras comprenden la adecuación geomorfológica de la zona afectada, el establecimiento de una red de drenaje para el control de la escorrentía, la reposición del suelo y la revegetación. Aunque existen diversas opciones para la recuperación de la cubierta edáfica, el empleo de tierras importadas y de materiales residuales del proceso de extracción, mejorados con enmiendas orgánicas, es el procedimiento más frecuente. Las enmiendas orgánicas más empleadas son composts de distinto origen y lodos de depuradora urbana.

En la cantera de La Falconera se ha restaurado una parte de las zonas explotadas mediante el relleno del hueco con estériles mineros y la reposición de suelo a base de tierras importadas, siguiendo un modelo talud-berma que garantiza la estabilidad geotécnica de la zona. La revegetación ha consistido en siembras y plantaciones de una variedad notable de especies, tratando de favorecer la implantación de las autóctonas. Se describen las características morfológicas y analíticas de un tecnosol formado por la mezcla de tierras importadas y estériles mineros y se compara con otro preparado a base de tierras importadas fertilizadas con lodos de depuradora. Se discuten las ventajas e inconvenientes de estos dos tipos de suelos rehabilitados.

5.2.1. La restauración de las actividades extractivas en Cataluña

Cataluña presenta una notable diversidad de sustratos litológicos que han sido explotados históricamente en mayor o menor medida. Así, encontramos desde materiales magmáticos (granitos, basaltos, pórfidos) y metamórficos (pizarras y mármoles), hasta sedimentarios que son los que se explotan en mayor medida. La mayor parte de estos últimos corresponden a rocas carbonatadas (calizas, dolomías, creta), seguidos de gravas y arenas aluviales y, en menor medida, arcillas y yesos (figura 1). Estos recursos minerales son explotados por un elevado número de actividades extractivas distribuidas por toda la geografía catalana, principalmente siguiendo las grandes vías de comunicación y a lo largo de la costa (figura 2). La explotación de calizas es muy abundante en la zona del Macizo de Garraf (Cordillera Litoral) donde se localiza, entre muchas otras, la cantera La Falconera. Las extracciones de gravas y arenas son bastante abundantes en Cataluña y sus yacimientos muy explotados desde hace años. Por el contrario, no se encuentran demasiados yacimientos de arcillas puras, la mayor parte consisten en margas arcillosas, que se concentran en la Depresión Prelitoral. Tienen también interés económico algunas explotaciones de yeso. Por su parte, el granito se explota en algunos afloramientos muy localizados del Pirineo y la Serralada Litoral y Prelitoral.

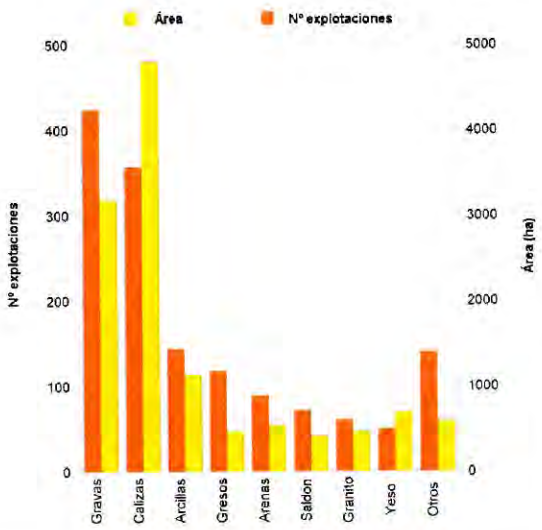


FIGURA 1. Número de actividades mineras y área de afección autorizada en función del recurso explotado, para las actividades extractivas catalanas en activo. Fuente: elaboración propia a partir de datos del EXTCATA 2010.

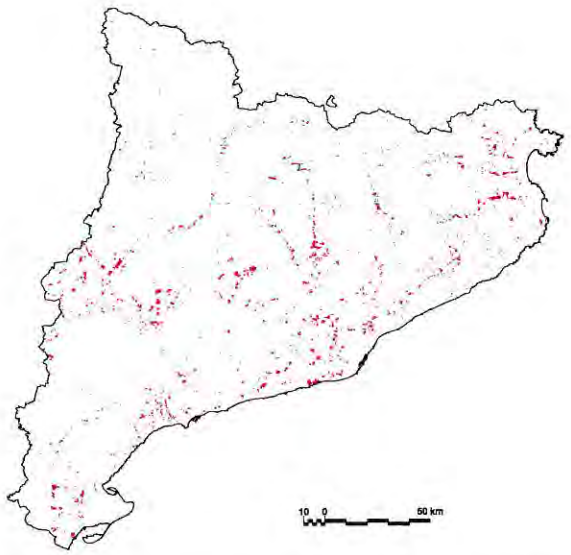


FIGURA 2. Mapa que muestra la distribución de las actividades extractivas en Catalunya (EXTCATA, diciembre de 2010). Fuente: Generalitat de Catalunya, Área de evaluación y restauración de actividades extractivas.

Según datos de la Generalitat de Catalunya, en el año 2010 existían unas 3.500 concesiones de actividad minera explotadas por más de mil empresas. Dentro de este cómputo global se contabilizan actividades extractivas situadas fuera del dominio público hidráulico (2.163), actividades que explotan dentro de éste (523) y también las actividades extractivas abandonadas. Dentro del conjunto de actividades en activo se pueden diferenciar aquellas que tienen una duración de pocos años, vinculadas normalmente a grandes obras públicas, de aquellas de gran magnitud cuya explotación se prolonga varias décadas y que tienen el objetivo de suministrar materia prima para la fabricación de cemento, áridos de trituración o piedra decorativa.

Las actividades mineras nos permiten satisfacer las necesidades de recursos minerales, áridos para la construcción y otras materias primas imprescindibles para la vida cotidiana y el progreso de nuestra sociedad. La producción de cemento en Cataluña el año 2009 fue de 584 kg per cápita (IDESCAT, 2011) y el consumo de áridos de unas 4 toneladas per cápita (*Gremi d'Àrids de Catalunya*, 2010), habiendo sufrido una fuerte recesión estos tres últimos años. Por otro lado, el proceso extractivo conlleva toda una serie de afecciones al medio ambiente que se manifiestan en forma de diversos impactos ambientales desde el comienzo de la explotación, y que se deben corregir de acuerdo con las normativas vigentes. En este contexto, la minimización de impactos y la recuperación de las zonas afectadas por minería es una obligación que asumen las empresas explotadoras como una condición más de su proceso productivo y que la Administración debe controlar.

La restauración de los espacios afectados por actividades extractivas en Cataluña está regulada por la Ley del *Parlament de Catalunya* 12/1981, de 24 de Diciembre, y el correspondiente decreto de desarrollo (Decreto 343/1983, de 15 de Julio). Según esta normativa, las actividades extractivas deben tener un Programa de Restauración aceptado por la administración ambiental competente, en el que se determinen las actuaciones que se han de llevar a cabo para conseguir que los terrenos afectados sean objeto de un adecuado tratamiento de restauración y acondicionamiento mientras duren los trabajos de extracción y, sobre todo, al finalizar el aprovechamiento del recurso minero. Para contrarrestar los impactos

y efectos negativos sobre el medio, el Programa de Restauración de cada actividad recoge las acciones a aplicar sobre las áreas de extracción y de procesado del recurso minero.

Las empresas extractivas están obligadas a depositar fianzas con objeto de garantizar la restauración de las zonas afectadas por la actividad minera. En el caso de incumplimiento de las medidas fijadas en el programa de restauración, dichas fianzas pueden ser utilizadas por la administración competente para garantizar la ejecución de las medidas de restauración pertinentes. La fianza se fija en función de la superficie afectada, el coste global de la restauración y de otros parámetros como el tipo de relleno morfológico, el tipo de cubierta vegetal, las obras auxiliares, etc. Cuando una actividad ha finalizado las labores de restauración puede solicitar el retorno de las fianzas una vez transcurrido el período de garantía. Este período debe permitir la evaluación de la eficacia de las medidas adoptadas, así como sus resultados. En la misma autorización para la explotación se fija el plazo del período de garantía, que oscila entre 5 y 3 años en función de si la actividad se ubica en un espacio de interés natural o no, y que se inicia en el momento en que el titular del derecho minero comunica la finalización de las labores de restauración. El titular mantiene su responsabilidad sobre la zona restaurada hasta que la administración emite informe favorable, una vez transcurrido el periodo de garantía. En el año 2010 había 254 actividades extractivas en Cataluña que se encontraban en período de garantía, lo que corresponde a un 12% del total de actividades situadas fuera del dominio público hidráulico.

A partir del año 1988 se empezó a implantar en los programas de restauración el criterio de planificación de la restauración de forma integrada al proceso de explotación, como un mecanismo para minimizar los impactos de aquellas actividades que realizaban labores de extracción minera durante muchos años. La restauración integrada se basa en el principio de la minería de transferencia, procurando aprovechar los movimientos de tierra que genera el proceso de explotación para restaurar zonas ya agotadas. Se trata de un mecanismo muy eficiente, ya que permite acelerar el proceso de restauración a la vez que optimiza los costes de las actividades, asegurando su viabilidad y ejecución. Además, consigue reducir las superficies denudadas y refuerza la vinculación entre explotación y restauración. Por otro lado, además de la optimización de los costes de restauración, también supone una reducción de los costes vinculados a las fianzas, ya que las empresas que realizan este tipo de restauración pueden solicitar la devolución por etapas de las fianzas correspondientes a las zonas restauradas. En el año 2010 había en Cataluña un total de 313 actividades extractivas que se encontraban en régimen de restauración integrada, la mayoría de ellas canteras de caliza o graveras.

En este contexto, la Generalitat de Catalunya ha hecho un esfuerzo importante en materia de seguimiento y control de las actividades extractivas. En 1994 la actual Área de Restauración y Evaluación de Actividades Extractivas empezó una campaña de informatización de sus bases de datos y de creación de una cartografía digital temática. Así se generó el mapa digital de actividades extractivas de Cataluña (EXTCATA) que se actualiza periódicamente. Este mapa y su base de datos contiene información bastante detallada sobre cada actividad, indicando la empresa titular, el tipo de recurso explotado, el perímetro de terreno autorizado para la explotación, la situación en que se encuentra la actividad, etc. (figura 3). Se trata de una cartografía consultable en la web de la Generalitat que es de gran utilidad, tanto para la administración, como para las propias empresas del sector. Por otro lado, también en 1994, se inició un programa para localizar y delimitar aquellos espacios afectados por actividades extractivas abandonadas antes de la entrada en vigor de la Ley 12/1981, y para buscar alternativas de restauración. Fruto de este trabajo, el 1999 la Generalitat publicó un mapa detallado de localización de todas las actividades extractivas abandonadas de Cataluña (EXTABA). Recientemente se han iniciado diversos proyectos de

FIGURA 3. Fragmento del mapa EXTCATA, de diciembre de 2010, correspondiente a la zona del Garraf. Se pueden observar explotaciones mineras en diferentes tipos de situación administrativa: con restauración integrada, con afección pendiente de regularización, restaurada en periodo de garantía, en activo y con restauración no iniciada, etc.

investigación encaminados a la exploración de las posibilidades de la teledetección en el seguimiento y control tanto de las labores de explotación minera como de su restauración.

Otra de las líneas promovidas por la Generalitat en materia de restauración de actividades extractivas ha sido el desarrollo de protocolos y herramientas encaminadas a mejorar la calidad de las restauraciones y al aprovechamiento de subproductos inherentes al propio proceso de explotación, entre otros. En este sentido, mediante convenios y proyectos con universidades y centros de investigación, se han explorado las posibilidades de utilización de diversos tipos de materiales de relleno (zahorras, escombros inertes, etc.) en la restauración morfológica de los huecos de extracción (Jorba *et al.*, 1992), o bien las ventajas y riesgos que puede tener la utilización de determinadas enmiendas orgánicas, como compost, purines o lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), en la corrección de materiales utilizados para la creación de los substratos de restauración de las zonas explotadas. Resultado de este trabajo ha sido la publicación del manual de *Utilización de lodos de depuradora en restauración* (Alcañiz *et al.*, 2009). También se han estudiado las posibilidades de aprovechamiento de lodos minerales procedentes del lavado de áridos para la corrección mineral de determinados suelos agrícolas, así como para usos industriales (fabricación de vidrio, cerámica, aplicaciones en la industria química, etc.). Por otro lado, merece ser destacado que durante los años 2004-2007 se llevó a cabo el proyecto coordinado por la Universidad de Barcelona en el que participaron investigadores de diversos centros de Cataluña, denominado *Ecotecnología medioambiental para la restauración de canteras de caliza – EcoQuarry Life,* financiado por la Unión Europea con la colaboración de la Generalitat y empresas del sector, en el que se pusieron en práctica innovaciones técnicas de restauración ecológica en forma de pruebas piloto, y en las que participó la cantera La Falconera. Fruto de este proyecto ha sido el *Manual para la restauración de canteras de roca caliza en clima mediterráneo* (Jorba *et al.*, 2010) que incorpora criterios técnicos y ecológicos adaptados a las condiciones ambientales en que se encuentran nuestras actividades extractivas y que se está difundiendo en el sector. Actualmente se está trabajando en el desarrollo de un protocolo de autoevaluación de la calidad de las restauraciones con el objetivo de que sirva de herramienta práctica de control del proceso de restauración tanto para la propia administración como para el sector extractivo.

Todo este esfuerzo facilitador por parte de la administración se ha visto acompañado de un cambio progresivo de mentalidad en las empresas, que han incorporado la restauración y las buenas prácticas ambientales dentro del propio proceso extractivo, optimizando así los costes de la restauración, incrementando de forma paulatina la calidad de las restauraciones efectuadas y reduciendo los impactos generados durante la extracción y procesado de los productos mineros. Así, se han logrado actuaciones y restauraciones ejemplares que han aparecido referenciadas en documentos de trabajo elaborados por la Comisión Europea (EC, 2010). En el conjunto del territorio catalán existen ya más de 800 zonas de extracción minera restauradas, lo que supone un 40% de las actividades situadas fuera del dominio público

hidráulico. Dentro de estas, el 70% corresponde a restauraciones en que se ha completado el período de garantía y se ha procedido a la devolución de las respectivas fianzas.

5.2.2. Etapas principales del proceso de restauración de una cantera

La restauración de los espacios afectados por las actividades extractivas debe ajustarse a lo previsto en el proyecto incluido en el denominado Programa de Restauración. La primera etapa consiste en el modelado del nuevo relieve de las zonas afectadas para garantizar la estabilidad geotécnica del sustrato y para conseguir la integración paisajística con el entorno. Es muy habitual que en las nuevas laderas se aplique el modelo talud - berma que permite el control de la escorrentía y facilita el acceso mecanizado a toda la zona para las posteriores operaciones. Sin embargo, si se aplica de forma extensa y geométrica conduce a morfologías artificiales. La segunda etapa, no menos importante, va asociada a la primera y en muchos casos se ejecuta conjuntamente; consiste en la construcción de la red de drenaje para controlar la escorrentía y su conexión con la red natural. Ésta debe estar bien dimensionada, con canales protegidos de la erosión y debe procurarse que su diseño sea lo menos artificial posible. La tercera etapa consiste en la reposición de la cubierta edáfica, ya sea el suelo original de la zona, separado por decapado (capaceo) antes de la explotación y conservado adecuadamente, o bien mediante la extensión de una capa de nuevo suelo que se explicará con más detalle en el próximo apartado. La cuarta etapa, que en determinadas ocasiones puede no ser imprescindible, comprende las operaciones encaminadas a la revegetación de la zona, mediante siembras y plantaciones, con objeto de proteger el suelo de la erosión y recuperar las comunidades vegetales características de la zona. No siempre resulta fácil compaginar la protección frente a la erosión, que demanda recubrimientos elevados del suelo, con el desarrollo de la formación vegetal autóctona, que requiere la introducción de especies arbustivas y arbóreas de crecimiento relativamente lento. Finalmente, la quinta etapa, que a veces es ignorada, comprende el seguimiento y control de las zonas restauradas -al menos durante el periodo de garantía- para mantener funcional la red de drenaje, controlar la estabilidad de los taludes, reponer las marras en las plantaciones y en definitiva, realizar el control de calidad de la zona restaurada antes de la inspección final por parte de la Administración, que será la que decida si procede el retorno de las fianzas.

5.2.3. La preparación de nuevos suelos para la rehabilitación del terreno

Uno de los aspectos que más condicionan la evolución de la cubierta vegetal, y en definitiva la integración paisajística de una zona restaurada, es la composición y las propiedades del nuevo suelo restaurado. Estos suelos creados por el hombre se denominan Tecnosoles en el nuevo sistema de clasificación WRB 2006 (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007).

5.2.3.1. Origen y características de los substratos empleados en la restauración

Es importante diferenciar los materiales utilizados para el relleno de los huecos de extracción de roca, de los empleados en la restauración del suelo, es decir, lo que los técnicos del sector denominan la capa de "suelo edáfico" o más comúnmente "tierra vegetal" que no suele superar los 80 cm de grosor.

Los tipos de materiales utilizados en la creación de Tecnosoles para la restauración de canteras son: (1) el propio suelo original separado por decapado (en general escaso), (2) las tierras procedentes de obras cercanas, (3) los restos del proceso de extracción de la roca formados por finas capas de arcilla o margas intercaladas en las calizas que no tienen utilidad comercial y, (4) los residuos del proceso de trituración o cribado de los áridos (zahorra) que tienen un contenido muy elevado de carbonatos.

En el caso que nos ocupa, los suelos originales de esta zona del Macizo de Garraf suelen ser muy pedregosos en superficie, esqueléticos, calizos, de textura franco-arcillosa, con procesos de rubefacción y descarbonatación evidentes en las zonas donde alcanzan mayor evolución (*terra rosa*), y con contenidos relativamente elevados de materia orgánica en el horizonte A. Su separación por decapado suele ser difícil y los volúmenes obtenidos resultan insuficientes para su reposición directa en las zonas a restaurar por lo que habitualmente terminan mezclados con materiales residuales de la cantera o tierras externas. Sería deseable que el suelo rehabilitado tuviera una pedregosidad parecida a la del natural, aunque un parecido total raramente se consigue (tabla 1).

TABLA 1. Comparación cualitativa de las características de los suelos naturales del entorno y los de zonas restauradas en canteras del Macizo de Garraf (síntesis de resultados de varias canteras)

Característica	Suelos naturales	Suelo restaurado
Profundidad	Variable, poco profundo	Variable, profundo a base de rellenos
Distribución espacial del suelo	Heterogénea, depósitos coluviales, bolsadas	Homogénea por zonas (taludes/bermas), rellanos
Pedregosidad superficial	Elevada	Baja
Elementos gruesos	Muy abundantes	Frecuentes
Composición elementos gruesos	Homogénea (calizas)	Heterogénea (impropios, cantos rodados, etc.)
Mineralogía dominante	Calcita, dolomita, arcillas	Arcillas, calcita
Textura	Franco-arcillosa	Franco-limosa, franco arenosa
Contenido de carbonatos (tierra fina)	Variable, medio-bajo	Variable, elevado, especialmente si se utilizan residuos de trituración de caliza
Materia orgánica (0-20cm)	Medio-alto	Medio-bajo (excepto si se utilizan enmiendas orgánicas)
pH	7- 8,5	6,8 – 8,7 (rango mayor)
C/N	10-12	8-12
P Olsen (mg/kg)	<15	(rango muy amplio)
K asimilable ($AcNH_4$)	Medio-bajo	Medio-bajo
Salinidad	Muy baja	Baja (salvo excepciones)
Capacidad de Retención de Agua Disponible (CRAD)	Baja (excepto en fondos de valle)	Media (influyen las características del subsuelo, rellenos)

Es frecuente que las canteras de calizas situadas en el entorno del área metropolitana de Barcelona reciban tierras procedentes de las obras que se realizan en los alrededores, como sucede en La Falconera. En el caso de que procedan de obras públicas de cierta envergadura, como las tierras extraídas por las tuneladoras que están construyendo las nuevas líneas de metro, autovías de acceso o el tren de alta velocidad, los volúmenes generados son muy grandes y su composición relativamente homogénea; sin embargo cuando proceden de obras de menor tamaño su composición y calidad es muy irregular y de difícil control. En este último caso suelen contener una proporción considerable de los llamados impropios (escombros, hierros, restos de cerámica, hormigón, plásticos, etc.), a pesar de su catalogación como "tierras limpias" que posibilita su destino final en actividades extractivas. Se excluyen para este uso los materiales catalogados como escombros (residuos de la construcción) que deben ser enviados a una planta de reciclaje de áridos o a un vertedero adecuado (muchos de ellos ubicados en antiguas actividades extractivas).

En cuanto a los residuos del proceso de extracción de roca caliza, consisten en capas o bolsas que no tienen la dureza requerida para la fabricación de áridos, o también vetas de

arcillas o margas intercaladas entre las calizas. Estos materiales se suelen emplear como rellenos del hueco de extracción pero en caso de no disponer de tierras suficientes, pueden ser empleados como base para la preparación de Tecnosoles. Incluso cuando se dispone de tierras suficientes, es conveniente incorporarlos a los substratos de restauración para proporcionar un contenido de elementos gruesos que se asemeje más al del suelo original. Si se utilizan directamente como substituto del suelo es necesario casi siempre incorporar enmiendas orgánicas.

En las canteras de esta zona suelen tener una composición muy rica en caliza ya que se originan al machacar la roca en el proceso de obtención y clasificación de los áridos. Comprenden las denominadas zahorras artificiales y la fracción fina del proceso de tamizado de los áridos sin interés comercial. Algunas canteras disponen de una planta de lavado de áridos que genera unos limos residuales que se separan por un proceso de decantación o prensado. Estos residuos se utilizan para el relleno de huecos en canteras, pero en algún caso se emplean también para la preparación de Tecnosoles por lo que deben ser corregidos con enmiendas. El exceso de carbonatos y su granulometría limosa son los principales inconvenientes de este tipo de materiales.

5.2.3.2. Preparación de suelos artificiales

En las canteras de caliza de Cataluña abundan dos tipos de Tecnosoles: (1) los esqueléticos, formados mayoritariamente por los materiales de rechazo pedregosos de las canteras (*Tecnosoles spólicos*) y (2) los que podríamos denominar *"térricos"*, en los que predominan las tierras importadas, más o menos fértiles. Entre ambos extremos se encuentran suelos de características intermedias, incluso en una misma cantera.

La tendencia actual consiste en combinar diferentes materiales para construir un suelo más equilibrado, con unas especificaciones de calidad como las que se recomiendan en el *Manual para la restauración de canteras de roca caliza en clima mediterráneo* (Jorba *et al.*, 2010). Utilizando la maquinaria disponible en las canteras es posible diseñar el nuevo suelo a medida de los objetivos de revegetación y de integración paisajística deseados. Cuando no se dispone de suficiente suelo de decapado y se construye el Tecnosol a base de materiales de rechazo de la propia cantera, o se utilizan tierras de importación de capas profundas, suele ser necesario incorporar enmiendas orgánicas que deben ser correctamente dosificadas e incorporadas al sustrato. En las canteras de Cataluña los tipos de enmiendas orgánicas más utilizados son composts de diverso origen, purines (Salazar *et al.*, 2009) y lodos de EDAR (Alcañiz *et al.*, 2009). Uno de los perfiles que se describen en este capítulo corresponde a un talud restaurado con tierras fertilizadas con lodos de EDAR.

5.2.3.3. Clasificación tentativa

Desde el año 2006 la WRB incluye un grupo de suelos de referencia denominado Tecnosoles. Estos suelos contienen una cantidad significativa de artefactos (reconocibles en el suelo porque han sido hechos o extraídos de la tierra por el hombre), o están sellados por roca dura técnica (material duro creado por el hombre, que tiene propiedades diferentes a la roca natural). Los tecnosoles incluyen suelos de desechos (rellenos, lodos, escorias, escombros o desechos de minería y ceniza), pavimentos con sus materiales subyacentes no consolidados, suelos con geomembranas y suelos construidos con materiales hechos por el hombre. Los Tecnosoles son frecuentemente referidos como suelos urbanos o de minas (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007). Se diferencian de los Antrosoles porque éstos conservan la base del suelo o subsuelo con pocas modificaciones y no contienen tantos artefactos.

Los suelos artificiales que se utilizan en la rehabilitación de canteras se sitúan en una posición intermedia entre ambos grupos de referencia, ya que habitualmente no alcanzan el 20% de artefactos que requieren los Tecnosoles, pero han sido completamente reconstruidos a partir de residuos de la cantera y de tierras aportadas de los alrededores, lo que supone una importante modificación de las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos originales. Por este hecho consideramos que encajan mejor en los Tecnosoles, más específicamente en los subgrupos *úrbico* o *espólico.* Se echa en falta un posible subgrupo *"térrico"* en los Tecnosoles, que reflejaría mejor este tipo de suelos formados por el aporte de tierras externas.

5.2.4. La restauración de la cantera La Falconera

La cantera La Falconera se encuentra situada en el municipio de Sitges, comarca del Garraf, provincia de Barcelona. Se trata de una actividad extractiva emplazada en el Parque Natural del Garraf, un espacio de interés natural incluido en la Red Natura2000 (catalogado como ZEPA y Lugar de Interés Comunitario). El Parque del Garraf alberga hábitats de elevado valor ecológico, así como especies amenazadas, como el águila perdiguera (*Hieraetus fasciatus*). Se trata de un paisaje mediterráneo meridional, dominado por un matorral denso. Las plantas dominantes son la coscoja (*Quercus coccifera*) y el lentisco (*Pistacea lentiscus*). También encontramos el palmito (*Chamaerops humilis*), el carrizo (*Ampelodesmos mauritanica*) y otras especies de origen africano. Una parte significativa está ocupada por bosques secundarios de pino carrasco.

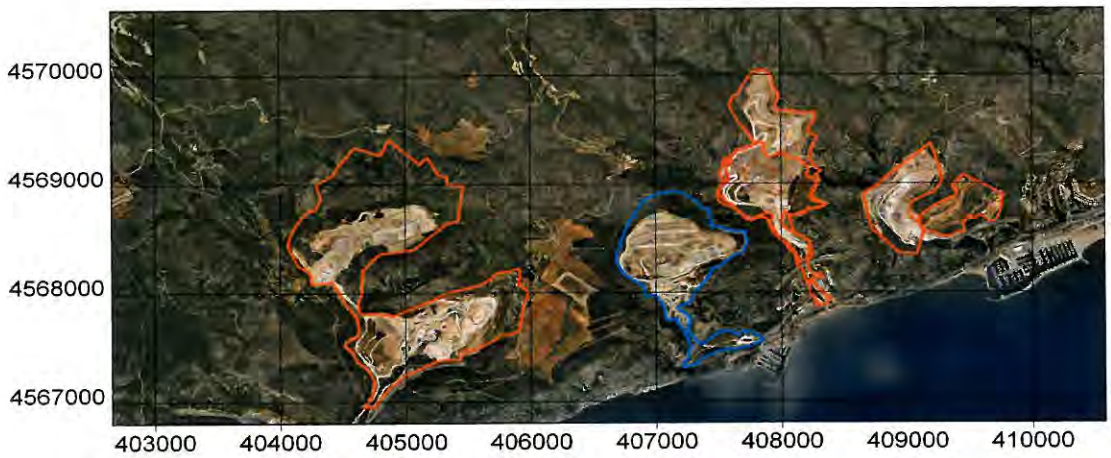


FIGURA 4. Las costas del Garraf concentran una importante densidad de actividades extractivas, como se puede observar en esta ortofotoimagen del Institut Cartogràfic de Catalunya. Las líneas naranjas representan los límites de diferentes concesiones y la azul los de La Falconera, según EXTCATA de diciembre de 2010.

El parque dispone de un plan especial de protección del medio físico y del paisaje, y de un plan urbanístico de protección, como principales figuras legales de protección. Dichas figuras son compatibles con la explotación de los recursos litológicos existentes en el parque, lo que debido a la calidad de la roca y a la proximidad a la conurbación de Barcelona, se traduce en una importante densidad de actividades extractivas en la zona (figura 4).

La superficie de afección autorizada para la cantera La Falconera es de unas 80 ha. Según datos del 2010, más de la mitad de esta superficie (42 ha) corresponde a suelo desnudo por labores de explotación, aunque existen todavía importantes reservas de suelo no afectado (17 ha). El 13% de la superficie de afección autorizada corresponde a equipamientos vinculados al proceso de explotación o de tratamiento de los materiales (plantas machacadoras, vías de acceso, acopios, oficinas, etc.).

Las primeras labores de restauración se efectuaron durante los años 90, en la parte baja de la explotación, en una superficie de aproximadamente 8,5 ha. Fue en la década siguiente cuando se empezó a restaurar en la parte alta de la explotación (4 ha). En la actualidad hay un total de 11 hectáreas restauradas, lo que supone un 14% de la superficie de afección autorizada y un 26% de la superficie en explotación. La empresa PROMSA, explotadora de la actividad, se caracteriza por sus iniciativas de carácter ambiental, siendo su política de gestión ambiental un referente a nivel nacional e internacional (EC, 2010). La empresa ha colaborado en diferentes proyectos de investigación y transferencia, como el proyecto RESTOFANGS, prueba piloto de utilización de lodos de EDAR como enmienda orgánica, o el proyecto ECOQUARRY antes citado, de transferencia de conocimientos técnicos y científicos a la práctica de la restauración.

El sistema de restauración del suelo utilizado en La Falconera se basa en el uso intensivo de materiales de aportación externa, básicamente tierras procedentes de excavaciones de obras. No obstante, el uso de estériles o tierras de rechazo también es habitual. En todo caso, estos son los materiales utilizados en las labores de relleno, sin llegar a realizar voladuras en banco. El modelo geomorfológico aplicado es el de talud-berma, en las zonas con mayor pendiente, y el de talud continuo con ondulaciones en las zonas de menor pendiente (figura 5). Sin embargo, en la parte baja de la explotación se pueden observar unos antiguos frentes rocosos en forma de paredes casi verticales que se tuvieron que dejar dada la imposibilidad de realizar otra adaptación geomorfológica en esta zona. Se trata de zonas explotadas antes de la entrada en vigor de la Ley 12/1981, y que consecuentemente no se explotaron de forma apta para la restauración. No obstante, este tipo de afloramiento rocoso es habitual en el macizo de Garraf, lo que ayuda a integrar dicha zona en su contexto paisajístico.

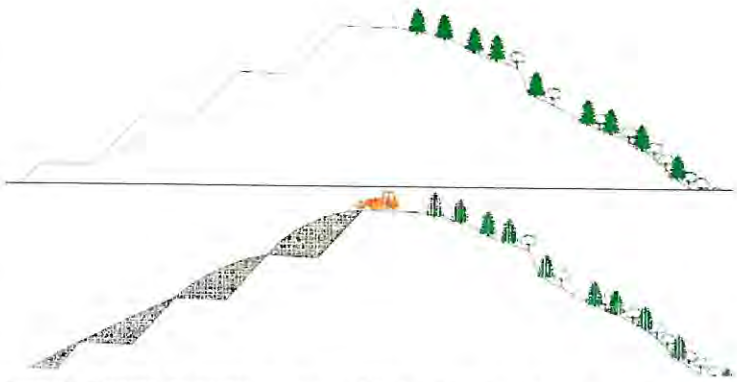


FIGURA 5. Proceso de adaptación geomorfológica mediante relleno con materiales de aportación realizado en La Falconera. Fuente: PROMSA.

Una vez realizada dicha adaptación morfológica se procede a extender los sustratos que formarán el "suelo edáfico" o capa superficial de "tierra vegetal", previamente enmendados, si procede, con compost o lodos de EDAR. Como se ha comentado, los sustratos utilizados para la creación de los Tecnosoles consisten básicamente en tierras de aportación externa, normalmente procedentes de la zona de Gavà, Viladecans, Castelldefels, u otras poblaciones cercanas. Se trata de sustratos con unas características diferentes de las de los suelos naturales de Garraf. Otra diferencia importante es la profundidad del suelo, mucho mayor en las zonas restauradas que en las zonas naturales, donde predominan los suelos lépticos.

5.2.5 Descripción de los Tecnosoles de La Falconera

Seguidamente se procede a describir dos Tecnosoles creados para la restauración: uno a partir de tierras externas, en su mayoría sin enmendar, y otro formado también con tierras importadas, pero enmendadas con lodos de EDAR.

5.2.5.1. Tecnosol a partir de tierras de importación sin enmendar

Información general

PERFIL: La Falconera 1 (Ref. FAL-1)

FECHA DESCRIPCIÓN: 18/01/2010

DESCRIPTORES: Josep M. Alcañiz y Vicenç Carabassa

SITUACIÓN: Sierra de la Coma Roja, Cantera La Falconera, PROMSA, Término municipal de Garraf (Comarca del Garraf), provincia de Barcelona

Cartografía

COORDENADAS UTM: 31N

X= 407442

Y= 4568208

ALTITUD: 152 m

Geomorfología

FORMA DEL RELIEVE: Ladera convexa

PENDIENTE: 48%

ORIENTACIÓN: Noroeste

SITUACIÓN DEL PERFIL: en la parte alta de la vertiente, surcos de erosión estabilizados

Material original

Aportes de tierras varias de la zona de Gavà (suelos aluviales cuaternarios; conglomerados de matriz franco-arenosa, predominantemente calizos, sin cementar), que incluyen restos de escombros. Sustrato formado por rellenos de más de 10 m de espesor

Uso del suelo y vegetación

Yermo, restauración del medio natural (paisaje de rocas calizas, kárstico). En la actualidad, herbazal xerófilo evolucionando a maquia de palmito, romero y lentisco. Recubrimiento global, 90%. Especies más abundantes: *Hyparrenia hirta, Lolium multiflorum, Dactylis glomerata, Sanguisorba* sp., *Trifolium* sp., *Foeniculum vulgare, Psoralea bituminosa, Plantago lanceolata, Malva* sp., *Dorycnium pentaphyllum, Helicrisum stoechas, Melilotus officinalis, Brachypodium retusum, Diplotaxis erucoides, Medicago sativa, Euphorbia* sp., *Mercurialis* sp., *Vicia* sp., *Rosmarinus officinalis, Santolina chamaecyparisus, Arundo donax, Pistacia lentiscus, Inula viscosa, Rosmarinus officinalis, Pinus halepensis.*

Características superficiales

PROFUNDIDAD EFECTIVA: >85 cm

PEDREGOSIDAD SUPERFICIAL Y AFLORAMIENTOS ROCOSOS: Ligeramente pedregoso (10%), gravas a cantos. Sin afloramientos rocosos en esta ladera, pero muy frecuentes en el resto de la zona

DRENAJE: Bien drenado

CAPACIDA DE RETENCIÓN DE AGUA DISPONIBLE (CRAD): Media-alta

Clima general y del suelo

Mediterráneo-litoral

P: 660mm

T media anual: 14,6°C (Atlas Climático Digital de Catalunya, 2004)

RÉGIMEN DE HUMEDAD: xérico

RÉGIMEN DE TEMPERATURAS: térmico

Clasificación (tentativa)

Tecnosol úrbico spólico (calcárico, esquelético) WRB (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007);

Xerarent háplico. Soil Taxonomy (USDA, 2006)

FIGURA 6. Zona restaurada con tierras de aportación externa en la actividad extractiva La Falconera. Autor: V. Carabassa.

FIGURA 7. Perfil FAL-1. Se aprecia la heterogeneidad del Tecnosol formado como mínimo por la mezcla de dos tipos de tierras (la de color rojizo descrita como material 1, y la blanquecina como material 2). Autor: V. Carabassa.

Descripción macromorfológica de los horizontes (FAO, 2006)

0 a 20/25 cm A

ESTADO DE HUMEDAD: Húmedo. ESTADO REDOX: Oxidado. COLOR (del material disgregado): 7,5YR 4/6 en húmedo, 7,5YR 5/3,5 en seco. MANCHAS: Sin manchas. ELEMENTOS GRUESOS: Muy frecuentes (59% en peso), poligénicos (calizas, cuarcita, con algunos fragmentos de hormigón o cerámica), heterométricos (de grava a piedras), formas diversas, distribución irregular. TEXTURA: Franca. ESTRUCTURA: En pequeños bloques subangulares yuxtapuestos a una estructura granular de tamaño medio, débil. CONSISTENCIA: Muy friable. MATERIA ORGÁNICA: Poca (1,25%). ACTIVIDAD DE LA FAUNA: Conchas de caracoles en superficie, galerías de lombrices. RAÍCES: Finas y medianas, frecuentes. POROSIDAD: Alta. ENSAYOS DE CAMPO: Reacción intensa al HCl. LÍMITE INFERIOR, TRANSICIÓN: sin discontinuidades edáficas, ondulado, gradual. HORIZONTE DE DIAGNÓSTICO: (pseudo) Ócrico

20/25 a 48/55 cm C1

ESTADO DE HUMEDAD: Húmedo. ESTADO REDOX: Oxidado. COLOR (del material disgregado): 7,5YR 4,5/3,5 en húmedo, 7,5YR 5,5/3 en seco; (material 1, sin disgregar. Ver figura 7): 7,5YR 4/4, en húmedo; (material 2, sin disgregar. Ver figura 7): 10YR 6/4, en húmedo. MANCHAS: Sin manchas. ELEMENTOS GRUESOS: Abundantes (53% en peso), poligénicos (calizas, con algunos fragmentos de hormigón, cerámica, vidrio, hierros o asfalto), heterométricos (de grava a piedras), formas diversas, distribución irregular. TEXTURA: Franca. ESTRUCTURA: Granular de tamaño medio, muy débil. CONSISTENCIA: Muy friable. MATERIA ORGÁNICA: Muy poca (0,65%). ACTIVIDAD DE LA FAUNA: Algunas galerías de lombrices. RAÍCES: Finas y medianas, pocas. POROSIDAD: Alta. ENSAYOS DE CAMPO: Reacción intensa al HCl, irregular, mayor en las zonas de material de color más claro. LÍMITE INFERIOR, TRANSICIÓN: Sin discontinuidades edáficas apreciables, ondulado, gradual. Horizonte constituido por la mezcla de dos materiales como mínimo.

48/55 a >90 cm C2

ESTADO DE HUMEDAD: Húmedo. ESTADO REDOX: Oxidado. COLOR (del material disgregado): 10YR 6/5 en húmedo, 10YR 6/4 en seco; (material 1, sin disgregar. Ver figura 7): 7,5YR 4/4, en húmedo; (material 2, sin disgregar. Ver figura 7): 10YR 6/4, en húmedo. MANCHAS: Sin manchas. ELEMENTOS GRUESOS: Abundantes (55% en peso), poligénicos (calizas, con algunos fragmentos de hormigón, cerámica o asfalto), heterométricos (de gravilla a grava gruesa), formas subangulares, distribución irregular. TEXTURA: Franca. ESTRUCTURA: Granular de tamaño medio, muy débil. CONSISTENCIA: Muy friable. MATERIA ORGÁNICA: Muy poca (0,4%). ACTIVIDAD DE LA FAUNA: No observada. RAÍCES: Finas y medianas, pocas. POROSIDAD: Alta. ENSAYOS DE CAMPO: Reacción intensa al HCl, irregular, mayor en las zonas de material de color más claro. LÍMITE INFERIOR, TRANSICIÓN: No observado. Horizonte constituido por la mezcla de dos materiales como mínimo.

FIGURA 8. Presencia de fragmentos de hormigón, cerámica, vidrio y otros desechos (artefactos) en los elementos gruesos del horizonte C1 del perfil FAL-1. Autor: V. Carabassa.

Datos analíticos

Horizonte	Propiedades químicas					
	pH H_2O	Cond. eléctrica (ext. 1:5; dS/m)	Carbonatos (%)	N Kjeldahl (%)	P Olsen (mg/kg)	Materia orgánica (%)
A	8,2	0,21	29	0,07	14	1,25
C1	8,2	0,28	41	0,07	8	0,65
C2	8,2	0,34	72	0,07	2	0,40

Complejo de cambio			
K (cmol/kg)	Ca (cmol/kg)	Mg (cmol/kg)	Na (cmol/kg)
0,5	17,4	1,1	0,1
0,2	19,1	0,8	0,1
0,1	17,8	0,7	0,2

Granulometría							
Toda la muestra			Tierra fina				
> 5 mm (%)	5-2 mm (%)	< 2 mm (%)	Limo grueso (%)	Limo fino (%)	Arcilla (%)	Arena total (%)	Clase textural
41	18	41	18,3	19,6	17,1	45,0	Franca
36	17	47	15,2	22,5	11,0	51,3	Franca
40	15	45	13,3	26,2	10,5	50,0	Franca

Metales pesados						
Hg (µg/kg)	Ni (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cu (mg/kg)
141	20	40	118	0,5	29	41

5.2.5.2. Tecnosol fertilizado con lodos de depuradora

Información general

PERFIL: La Falconera 6 (Ref. FAL-6)

FECHA DESCRIPCIÓN: 18/01/2010

DESCRIPTORES: Josep M. Alcañiz y Vicenç Carabassa

SITUACIÓN: Torrente de la Falconera, Cantera La Falconera, PROMSA, Término municipal de Garraf (Comarca del Garraf), provincia de Barcelona

Cartografía

COORDENADAS UTM: 31N

X= 407442

Y= 4568208

ALTITUD: 157 m s.n.m.

Geomorfología

FORMA DEL RELIEVE: Ladera cóncava

PENDIENTE: 75%

ORIENTACIÓN: Suroeste

SITUACIÓN DEL PERFIL: En la parte media de la vertiente, sin formas de erosión detectables

Material original

Estériles calizos de la propia cantera (calizas mesozoicas) y tierras de aportación externa que constituyen el relleno principal de la ladera sobre el que se ha depositado una capa de 30 a 60 cm de tierras procedentes de excavación de la zona de piedemonte del Macizo de Garraf (suelos formados sobre materiales detríticos, de matriz franco-arcillosa, rojiza, carbonatados)

Uso del suelo y vegetación

Restauración hacia la formación de bosque mediterráneo (paisaje de rocas calizas, kárstico). En la actualidad, herbazal ruderal evolucionando a bosque de *Pinus halepensis.* Recubrimiento global, 100%. Especies más abundantes: *Dactylis glomerata, Ampelodesmos mauritanica, Fumaria* sp., *Oryzopsis miliacea, Helicrisum stoechas, Inula viscosa, Arundo donax, Santolina chamaecyparissus, Phillyrea latifolia, Olea europaea* var. *sylvestris, Pinus halepensis*

Características superficiales

PROFUNDIDAD EFECTIVA DEL SUELO: >90 cm

PEDREGOSIDAD SUPERFICIAL Y AFLORAMIENTOS ROCOSOS: Muy ligeramente pedregoso (5%), gravas a bloques. Sin afloramientos rocosos en esta ladera, pero muy frecuentes en las proximidades

DRENAJE: moderado-bueno

CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE AGUA DISPONIBLE (CRAD): Media-alta

Clima general y del suelo

Mediterráneo-litoral

P: 660mm

T media anual: 14,6°C (Atlas Climático Digital de Catalunya, 2004)

RÉGIMEN DE HUMEDAD: xérico

RÉGIMEN DE TEMPERATURAS: térmico

Clasificación (tentativa)

Tecnosol úrbico spólico (calcárico, esquelético) WRB (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007);

Xerarent háplico Soil taxonomy (USDA, 2006)

FIGURA 9. Aspecto del talud restaurado con tierras fertilizadas con lodos de depuradora en la actividad extractiva La Falconera. Autor: V. Carabassa.

FIGURA 10. Perfil FAL-6. Se observan dos capas claramente diferenciadas, la superficial procedente de tierras externas enmendadas con lodos de EDAR, y la de color claro formada por estériles mineros. Autor: V. Carabassa.

Descripción macromorfológica de los horizontes (FAO, 2006)

Restos identificables de gramíneas en descomposición. Micelios de hongos aparentes.

ESTADO DE HUMEDAD: Ligeramente húmedo. ESTADO REDOX: Oxidado. COLOR (del material disgregado): Homogéneo, 7,5 YR 5/4 en húmedo, 5 YR 4/4 en seco. MANCHAS: Sin manchas. ELEMENTOS GRUESOS: Muy abundantes (70% en peso), de calizas (calizas mesozoicas, nódulos de carbonatos secundarios (caliche) heredados del suelo alóctono, muy escasos fragmentos de hormigón o cerámica), heterométricos (de grava fina a grava gruesa), formas subangulares, distribución regular. TEXTURA: Franca. ESTRUCTURA: En bloques subangulares yuxtapuestos a una estructura granular de tamaño grueso, moderada. Consistencia: Firme. MATERIA ORGÁNICA: Media (1,54%), humus. ACTIVIDAD DE LA FAUNA: galerías de lombrices, frecuentes. RAÍCES: finas, poco densas. POROSIDAD: media. ENSAYOS DE CAMPO: reacción intensa al HCl, homogénea. Acumulaciones: Sin acumulaciones (nódulos de caliche heredados). LÍMITE INFERIOR, TRANSICIÓN: Sin discontinuidades edáficas, plano, gradual. HORIZONTE DE DIAGNÓSTICO: (pseudo) Ócrico.

ESTADO DE HUMEDAD: Ligeramente húmedo. ESTADO REDOX: Oxidado. COLOR (del material disgregado): Homogéneo, 7,5 YR 5/4 en húmedo, 7,5 YR 4/5 en seco. MANCHAS: Sin manchas. ELEMENTOS GRUESOS: Abundantes (53% en peso), de calizas [calizas mesozoicas, nódulos de carbonatos secundarios (caliche) heredados del suelo alóctono, muy escasos fragmentos de hormigón o cerámica), heterométricos (de grava fina a grava gruesa], formas subangulares, distribución regular. TEXTURA: Franca. ESTRUCTURA: En bloques subangulares yuxtapuestos a una estructura granular de tamaño grueso, moderada. CONSISTENCIA: Firme. MATERIA ORGÁNICA: Poca (1,29%), humus. ACTIVIDAD DE LA FAUNA: Galerías de lombrices frecuentes. RAÍCES: Escasas, finas, poco densas. POROSIDAD: Media. ENSAYOS DE CAMPO: Reacción intensa al HCl, homogénea. ACUMULACIONES: Sin acumulaciones (nódulos de caliche heredados). LÍMITE INFERIOR, TRANSICIÓN: Sin discontinuidades edáficas, plano, neto. HORIZONTE DE DIAGNÓSTICO: (pseudo) Ócrico.

ESTADO DE HUMEDAD: Húmedo. ESTADO REDOX: Oxidado. COLOR (del material disgregado): Homogéneo, 7,5 YR 6/3,5 en húmedo, 7,5YR 5/3,5 en seco. MANCHAS: Sin manchas. ELEMENTOS GRUESOS: Abundantes (55% en peso), de calizas (calizas mesozoicas), heterométricos (de grava fina a grava media), formas angulares, distribución homogénea. TEXTURA: Franca. ESTRUCTURA: Sin agregación. CONSISTENCIA: muy friable. MATERIA ORGÁNICA: Poca (0,72%). ACTIVIDAD DE LA FAUNA: No observada. RAÍCES: Muy escasas. POROSIDAD: Media-alta. ENSAYOS DE CAMPO: Reacción muy intensa al HCl, homogénea. LÍMITE INFERIOR, TRANSICIÓN: no observada. Material estéril de la cantera procedente de la trituración de las calizas.

Datos analíticos

Horizonte	Propiedades químicas					
	pH H_2O	Cond. eléctrica (ext. 1:5; dS/m)	Carbonatos (%)	N Kjeldahl (% s.m.s.)	P Olsen (mg/kg)	Materia orgánica (%)
A1	8,2	0,19	33	0,08	97	1,54
A2	8,2	0,17	32	0,07	96	1,29
2C	8,2	0,20	44	0,07	13	0,72

Complejo de cambio			
K (cmol/kg)	Ca (cmol/kg)	Mg (cmol/kg)	Na (cmol/kg)
1,0	17,6	1,1	0,1
0,5	18,4	1,2	0,1
0,2	17,2	0,8	0,1

Universidad de Lleida

Granulometría							
Toda la muestra			Tierra fina				
> 5 mm (%)	5-2 mm (%)	< 2 mm (%)	Limo grueso (%)	Limo fino (%)	Arcilla (%)	Arena total (%)	Clase textural
58	12	30	22,7	24,2	22,5	30,6	Franca
42	11	47	24,2	23,6	21,7	30,5	Franca
40	15	45	22,2	24,6	13,2	40,0	Franca

Metales pesados						
Hg (µg/kg)	Ni (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cu (mg/kg)
58	21	24	95	0,5	34	26

5.2.5.3. Análisis comparativo

En la tabla 2 se muestran los resultados obtenidos para diferentes parámetros físico-químicos medidos en una muestra representativa de los dos Tecnosoles descritos anteriormente. Como se puede observar, existen diferencias significativas para la mayoría de los parámetros químicos medidos. Este resultado podría ser debido a la capacidad enmendante de los lodos, pues transcurridos 5 años desde su aplicación el contenido en nutrientes y carbono orgánico es mucho mayor en el Tecnosol creado utilizando lodos de depuradora como enmienda orgánica. No obstante, las diferencias observadas en los parámetros texturales indican que se utilizaron sustratos de base diferentes, aunque en ambos casos dichos sustratos eran tierras de excavación de procedencia externa. Este hecho ejemplifica la gran heterogeneidad existente en los Tecnosoles de zonas restauradas en actividades extractivas, especialmente cuando se utilizan tierras de aportación externa como sustrato base para la rehabilitación de suelos.

TABLA 2. Comparación de parámetros analíticos en el horizonte superficial (0-20 cm) del Tecnosol de la zona restaurada con lodos (FAL-6) y el de la zona restaurada sin el uso de enmiendas orgánicas (FAL-1). Se indica la desviación estándar (n=3). Letras distintas indican la existencia de diferencias significativas (P<0,04).

Parámetro	FAL-6	FAL-1
C_{org} (%)	0,90 ± 0,04 (a)	0,52 ± 0,21 (b)
P Olsen (mg/kg)	80 ± 16 (a)	16,0 ± 4,4 (b)
N Kjeldahl (% s.m.s.)	0,08 ± 0,01 (a)	0,07 ± 0,00 (b)
K (mg/kg)	339 ± 81 (a)	193 ± 5 (b)
Arena total (%)	31,4 ± 0,7 (a)	46,2 ± 6,1 (b)
Limo grueso (%)	21,4 ± 1,4 (a)	17,1 ± 2,1 (b)
Limo fino (%)	24,7 ± 0,5 (a)	21,2 ± 2,2 (a)
Arcilla (%)	2,5 ± 0,4 (a)	15,5 ± 2,9 (b)

5.2.6. Revegetación

La revegetación de las zonas restauradas es un aspecto sumamente importante y constituye una etapa clave del proceso restaurador. En Cataluña se han realizado varios estudios focalizados en la evolución de la vegetación de canteras de calizas que analizan la eficacia de las siembras, la viabilidad de las plantaciones y la recuperación de la vegetación autóctona (Jorba y Vallejo, 2008). La finalidad principal de las siembras es reducir la escorrentía superficial y la erosión, sobre todo justo después de haber extendido los Tecnosoles. No obstante, también hay que tener en cuenta que las especies sembradas no limiten el establecimiento de especies autóctonas. Por lo tanto, la selección de estas especies es relevante ya que puede condicionar el proceso de revegetación, pero también la aparición de posibles problemas de degradación. En determinadas circunstancias, y cuando el riesgo de erosión no es elevado, las siembras pueden no ser necesarias si la revegetación espontánea es efectiva.

Por otro lado, las plantaciones tienen como objetivo acelerar la integración ecológica de las zonas restauradas, aspecto importante en condiciones climáticas típicamente mediterráneas. Además, la siembra y plantación de especies que sirven como elemento de atracción de fauna favorecen la entrada y dispersión de especies autóctonas y aceleran, aún más si cabe, el proceso restaurador.

5.2.7. Experiencias de evaluación de la erosión

Entre los trabajos experimentales desarrollados en La Falconera se han efectuado mediciones de la erosionabilidad del suelo en condiciones de lluvia simulada (40 mm h^{-1} durante 45 minutos consecutivos) para evaluar la importancia del uso de enmiendas orgánicas (compost) y de la revegetación en el control de la erosión. Los resultados se sintetizan en la figura 11 e ilustran la gran importancia de estos dos factores en el control de la erosión. De esta forma, la mayor erosionabilidad se registró en el suelo sin tratar y sin cobertura, que presentó un valor medio un 80% mayor que el del suelo enmendado y sin cobertura. Cabe destacar que se obtuvieron valores intermedios de erosionabilidad en el suelo sin tratar pero con una alta cobertura herbácea (49 g m^{-2} h^{-1}) y en el suelo enmendado y con baja cobertura (60 g m^{-2} h^{-1}). En cuanto a los valores mínimos registrados, una alta cobertura vegetal en un suelo enmendado presentó una erosionabilidad un 98% menor que la del suelo no tratado y sin vegetación.

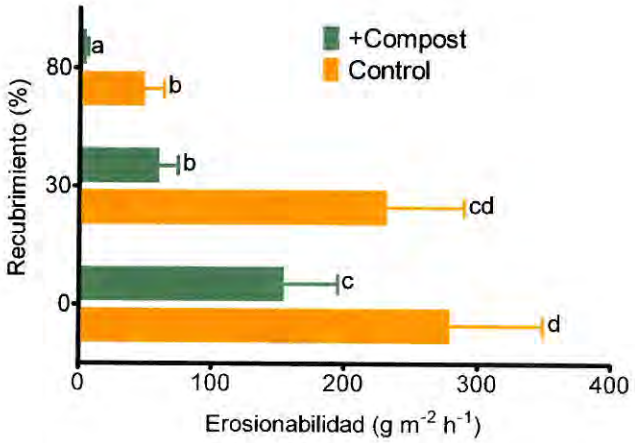


FIGURA 11. Resultados de medidas de erosionabilidad (con lluvia simulada) en suelos enmendados y no enmendados con compost y en tres grados de recubrimiento herbáceo distintos realizadas en la cantera La Falconera. Las barras de error corresponden al error estándar (n=3). Letras distintas indican la existencia de diferencias significativas (P<0,05).

Estos resultados demuestran la gran importancia que puede tener una adecuada preparación del suelo, sobre todo en situaciones donde el riesgo de erosión es alto o cuando no se prevé una recuperación rápida de la cubierta herbácea.

5.2.8. Referencias bibliográficas

ALCAÑIZ, J.M.; ORTIZ, O.; CARABASSA, V. (2009) Utilización de lodos de depuradora en restauración. Manual de aplicación en actividades extractivas y terrenos marginales. Agència Catalana de l'Aigua, Generalitat de Catalunya. 114p. Barcelona. Disponible en Internet.

ATLAS CLIMÁTICO DIGITAL DE CATALUNYA (2004) Disponible en Internet.

EUROPEAN COMISSION (2010) Non-energy mineral extraction and Natura 2000. Annex I. 25p.

FAO (2006) Guidelines for soil description. Fourth edition. 98 p. Rome.

GENERALITAT DE CATALUNYA (2010) Mapa d'activitats extractives. EXTCATA. Disponible en Internet.

GENERALITAT DE CATALUNYA (1999) Mapa d'activitats extractives abandonades. EXTABA. Disponible en Internet.

GENERALITAT DE CATALUNYA (2005) Mapa d'activitats extractives en domini públic hidràulic. EXTAIG. Disponible en Internet.

GENERALITAT DE CATALUNYA (2010) Restauració d'activitats extractives. Disponible en Internet.

GREMI D'ÀRIDS DE CATALUNYA (2010) Dades sectorials. Disponible en Internet.

IDESCAT (2011) Ciment 2006-2010 Consum i importacions. Disponible en Internet.

IUSS Grupo de Trabajo WRB (2007) Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.

JORBA, M., VALLEJO, V.R. (2008) La restauración ecológica de canteras: un caso con aplicación de enmiendas orgánicas y riegos. Ecosistemas 17 (3): 119-132.

JORBA, M., VALLEJO, R., ALCAÑIZ, J.M., JOSA, R., SOLE, A. (1992) Restauració del sòl en pedreres de roca calcària. I Trobada d'Estudiosos de Garraf. Monografies 19: 59-61, Diputació de Barcelona.

JORBA, M., OLIVEIRA, R., JOSA, R., VALLEJO, V.R., ALCAÑIZ, J.M., HERETER, A., CORTINA, J., CORREIA, O., NINOT, J.M. (2010) Manual para la restauración de canteras de roca caliza en clima mediterráneo. Direcció General de Qualitat Ambiental, Àrea d'Avaluació i Restauració d'Activitats Extractives, Generalitat de Catalunya. 104p. Barcelona.

SERRA, E. (1993) La protecció ambiental en la mineria a cel obert a Catalunya. El programa de restauració. Barcelona. (Edición interna del Departament de Medi Ambient).

SALAZAR, M., BOSCH-SERRA, A., ESTUDILLOS, G., POCH, R.M. (2009) Rehabilitation of Semi-Arid Coal Mine Spoil Bank Soils with Mine Residues and Farm Organic By-Products. Arid Land Research and Management 23 (4): 327-341.

USDA Natural Resources Conservation Service. Soil Survey Staff (2006) Keys of Soil Taxonomy. Tenth Edition.