



**Carla Sofia
Santos Ferreira**

**Processos hidrológicos na bacia da Ribeira dos
Covões**



**Carla Sofia
Santos Ferreira**

**Processos hidrológicos na bacia da Ribeira dos
Covões**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizada sob a orientação científica da Doutora Celeste de Oliveira Alves Coelho, Professora Catedrática da Universidade de Aveiro e, co-orientação do Doutor António José Dinis Ferreira, equiparado a Professor Adjunto no Departamento de Ciências Exactas e do Ambiente da Escola Superior Agrária de Coimbra.

o júri

Presidente

Prof.^a Maria Helena Gomes de Almeida Gonçalves Nadais
Professora Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. José Manuel Monteiro Gonçalves
Professor Adjunto do Departamento de Ciências Exactas e do Ambiente da Escola Superior Agrária de Coimbra

Prof.^a Dr.^a Celeste de Oliveira Alves Coelho
Professora Catedrática do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. António José Dinis Ferreira
Equiparado a Professor Adjunto no Departamento de Ciências Exactas e do Ambiente da Escola Superior Agrária de Coimbra

agradecimentos

À Professora Doutora Celeste de Oliveira Coelho, da Universidade de Aveiro, minha orientadora científica, pela disponibilidade e prontidão com que sempre me recebeu, pela correcção dos textos escritos e sugestões construtivas, bem como pela troca de conhecimentos.

Ao Professor Doutor António Dinis Ferreira, meu co-orientador e coordenador do projecto de investigação POCI/CLI/60421/2004 no qual se inseriu este trabalho, pelo contributo científico, confiança e apoio prestado no decurso do trabalho realizado.

Ao Laboratório de Solos e Fertilidade da ESAC pela disponibilidade de meios e equipamentos necessários para a análise físico-química das amostras de solo, e de modo especial o apoio laboratorial proporcionado pela Engenheira Leonor Pato.

À Professora Doutora Maria do Carmo Magalhães, pela troca de opiniões e conselhos cedidos durante o planeamento do trabalho de campo e análise de resultados.

À Engenheira Tânia Esteves, pelo seu trabalho e apoio na parte dos sistemas de informação geográfica.

Ao Engenheiro Sérgio Prats Alegre, do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro, pela amável troca de impressões científicas e, sobretudo, pelo apoio concedido na reprodução de equipamentos instalados no campo.

Ao Professor Doutor Pedroso Lima, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, pela cedência do equipamento para calibração do simulador de chuva e, ao Engenheiro Célio Duarte pela prontidão e amabilidade com que me ajudou neste processo.

Ao Professor Doutor Rory Walsh, da Universidade de Swansea (Reino Unido), pelo interesse manifestado no meu trabalho, sugestões e esclarecimentos na análise dos resultados.

Ao nível pessoal, agradeço a todos os amigos e colegas, em especial ao Nuno Francisco, Margarida Oliveira, Ana Felismina, Victor Tomé e Célia Bento, pela amizade, companheirismo e disponibilidade para me acompanharem na realização de trabalho de campo e, ainda, pelo incentivo proporcionado ao longo de todo o trabalho.

palavras-chave

Hidrologia, escoamento, infiltração, solos, bacia hidrográfica, uso do solo, urbanização

resumo

O presente trabalho tem como principal objectivo avaliar os processos hidrológicos numa bacia hidrográfica urbanizada. Neste sentido, seleccionou-se como área de estudo a ribeira dos Covões, localizada nas imediações da cidade de Coimbra, devido às suas características de área peri-urbana. Esta é uma bacia de pequenas dimensões (cerca de 7 Km²) e que apresenta uma população residente de aproximadamente 7000 habitantes, distribuída de forma assimétrica. Sobretudo nas últimas três décadas, esta área tem sido alvo de um processo contínuo de urbanização, representando o tecido urbano cerca de 25% da área total da bacia, no ano 2002.

O estudo hidrológico da bacia iniciou-se com a caracterização físico-química dos solos (textura, densidade aparente, capacidade máxima para a água, capacidade de campo, pH e matéria orgânica) a diferentes profundidades (0-2 cm, 5-7 cm e 15-17 cm). Esta caracterização incidiu sobre 13 locais seleccionados em função do uso do solo (urbano, florestal, agrícola, culturas arbóreas e terrenos abandonados) e da distância às linhas de água. Nestes locais foram ainda monitorizados, ao longo do tempo, o teor de humidade do solo, a hidrofobia e a capacidade de infiltração de água. Os resultados indicaram variações espaciais e temporais dentro da bacia, e diferentes respostas em locais com o mesmo uso do solo. A área de eucaliptal foi a que revelou menor condutividade hidráulica do solo (entre 0,007 e 0,307 m d⁻¹), enquanto que os valores mais elevados foram registados numa área de olival (0,194 - 2,314 m d⁻¹) e num terreno abandonado junto a uma zona residencial (0,737 - 2,056 m d⁻¹).

Com o objectivo de perceber a influência da cobertura do solo na geração de escoamento superficial, foram instaladas e monitorizadas parcelas fechadas, que revelaram que um solo desprotegido (cobertura apenas com pedras) promove a geração de escoamento entre 9 e 42% da precipitação registada, enquanto solos com 100% de cobertura (vegetação e material em decomposição) não proporcionam escoamento superficial.

De modo a perceber o impactes da intervenção humana/uso do solo nos processos hidrológicos, foram realizados ensaios de simulação de chuva em áreas florestais, desflorestadas, em áreas agrícolas lavradas e abandonadas, bem como em áreas sujeitas a obras de construção civil. Estes ensaios revelaram uma total infiltração da precipitação nas áreas agrícolas (0% de escoamento), diferenças pouco significativas entre as áreas florestadas e desflorestadas (30-37% da precipitação convertida em escoamento), e a geração de escoamento superficial em quantidades variáveis nas áreas intervencionadas com maquinaria pesada (40-45% de escoamento), com elevada carga de material sólido.

No intuito de avaliar a resposta hidrológica ao nível da bacia, foi analisada a relação entre a precipitação e o escoamento superficial, com base em dados recolhidos no ano 2005 e 2008. Esta relação é variável ao longo do ano, concentrando-se a maior parte do escoamento nos meses entre Dezembro e Março (67,4% em 2005, sem considerar o mês de Janeiro). De 2005 para 2008 os valores de escoamento aumentaram de 5,5% (sem Janeiro) para 9,1 % (entre Janeiro e Setembro), o que se pode dever à maior queda pluviométrica, podendo também querer reflectir o aumento da impermeabilização da bacia entre estes anos. O estudo de dados recolhidos em intervalos de tempo de 5 minutos, revelou ainda que a bacia dos Covões proporciona uma resposta bastante rápida aos eventos de precipitação, mas diferenciada ao longo do tempo, que se traduz por picos de cheia súbitos e que demonstram a sua vulnerabilidade ao processo de urbanização.

Contudo, os resultados apresentados são apenas preliminares e constituem uma pequena parte de um estudo muito mais abrangente, desenvolvido no âmbito do projecto POCI/CLI/60421/2004, financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

keywords

Hydrology, runoff, infiltration, soil, catchment, land use, urbanization

abstract

The present work was developed to evaluate hydrological processes in an actively urbanizing catchment. To achieve this goal, the Ribeira dos Covões catchment, in the outskirts of Coimbra, was selected as the study site because of its urban fringe situation. The catchment is relatively small (7 km²), with a 7,000 population concentrated in about 25 % of the area. The area has undergone both progressive urbanisation (and abandonment of rural land uses) particularly over the last three decades and by 2002 urban land use represented about 25% of the catchment area.

The hydrological study of the catchment started with a soil physico-chemical characterization (texture, bulk density, maximum water capacity, field capacity, pH and organic content) at different depths (0-2 cm, 5-7 cm e 15-17 cm). This was done in 13 locations of varying land use (urban, forest, agricultural, trees cultures and badlands) and distance to a watercourse. Soil moisture content, water repellency and infiltration capacity were monitored at different times to assess variations with season and antecedent weather. Significant spatial and temporal variations were recorded, including differences between sites of the same land use. Hydraulic conductivity was low in the eucalyptus area (0,007 - 0,307 m d⁻¹), but higher in olive groves (0,194 - 2,314 m d⁻¹) and in an abandoned area close to a residential zone (0,737 - 2,056 m d⁻¹). To try to understand the influence of soil cover in runoff, several bounded plots were installed and monitored. Whereas bare soil sites (covered only with stones) led to runoff of 9 - 42 % of the rainfall, soils with total coverage by vegetation and/or litter did not promote any overland flow.

Human intervention/land use impacts on overland flow and erosion were assessed by rainfall simulation experiments in forested, deforested, tilled agriculture and badland areas, and also in areas undergoing civil construction. Total rain infiltration (zero runoff) occurred in agriculture areas; intermediate runoff in forest and deforested areas (30-37% of rainfall) and highest runoff (40-45 %) and erosion in some urbanising sites due to compaction by machinery and people.

To evaluate hydrological catchment response, rainfall and stream runoff relationships were analysed using 2005 and 2008 data. Streamflow varied greatly with season, with highest flows in December and March (67% in 2005). Runoff increased from 5,5% (without January) in 2005 to 9,1% in 2008 (January to September). This may be due to higher rainfall in 2008, but it may also reflect an increase in the percentage of impermeable urban land over the period. The 5-minute-interval data collected demonstrated a relatively small, but flashy response of “Ribeira dos Covões” catchment to rainfall events, suggesting that parts of the urban section of the catchment were providing this quick response.

The presented results are only provisional and represent a small part of a larger project (POCI/CLI/60421/2004) funded by the Portuguese Science and Technology Foundation.

Índice

Índice de Figuras	
Índice de Tabelas	
Lista de Abreviaturas	
1. Introdução	1
2. Estado actual dos conhecimentos	3
2.1 Ciclo hidrológico	4
2.1.1 Componentes fundamentais.....	4
2.1.2 Impactes das alterações globais.....	6
Alterações de uso do solo	6
Alterações climáticas	9
2.2 Enquadramento legal	10
3. Metodologia.....	12
3.1 Selecção e caracterização da área de estudo.....	14
3.2 – Metodologia de campo	15
3.2.1 Monitorização de parâmetros físico-químicos do solo.....	16
3.2.2 Parcelas fechadas	21
3.2.3 Simulações de chuva	22
3.3 Metodologia laboratorial	26
3.3.1 Recolha e preparação de amostras.....	26
3.3.2 Humidade	26
3.3.3 Densidade aparente.....	27
3.3.4 Matéria orgânica	27
3.3.5 Análise mecânica.....	27
3.3.6 Capacidade de retenção de água.....	27
3.3.7 pH	28
3.4 Análise e tratamento estatístico dos dados	28
4. Caracterização da área de estudo.....	29
4.1 Caracterização biofísica.....	29
4.1.1 Morfologia.....	29
4.1.2 Geologia	31

4.1.3	Clima	31
4.1.4	Litologia	36
4.1.5	Solos	38
4.1.6	Recursos hídricos.....	40
4.1.7	Vegetação	42
4.2	Enquadramento sócio - económico.....	43
4.2.1	Análise demográfica	43
4.2.2	Uso do solo	45
	Evolução nas últimas décadas	45
	Uso do solo actual	47
5.	Resultados e Discussão.....	49
5.1	– Hidrologia dos solos	49
5.1.1	– Caracterização dos solos.....	49
5.1.2	– Variação temporal de algumas propriedades hidrológicas	64
5.1.3	– Relações entre variáveis	77
5.1.4	– Variações espaciais entre os pontos monitorizados.....	80
5.2	Influência da cobertura e uso do solo na geração de escoamento	82
5.2.1	Cobertura do solo	82
5.2.2	Uso do solo	86
	Descrição das parcelas de estudo.....	87
	Processos hidrológicos	93
5.2.3	- Erosão.....	98
5.3	Resposta hidrológica da bacia	100
5.3.1	Precipitação	100
5.3.2	Escoamento superficial.....	103
	Estudo de eventos chuvosos	108
6.	Conclusões.....	113
	Referências bibliográficas	
	Anexos.....	

Índice de Figuras

Figura 1 – Modificação do hidrograma unitário devido à urbanização progressiva da bacia (Lencastre & Franco, 2006).....	7
Figura 2 – Impacto das alterações da precipitação, como resultado das alterações climáticas, no hidrograma de cheia (adaptado de Telford, 2002).	9
Figura 3 – Representação esquemática da metodologia utilizada na realização deste trabalho.	13
Figura 4 – Localização da área de estudo.....	14
Figura 5 – Limnógrafo utilizado para monitorização da altura de água na ribeira dos Covões.	16
Figura 6 - Localização dos pontos de monitorização do solo.....	18
Figura 12 – Diagramas ombrotérmicos de Gausson na estação meteorológica de Coimbra/Bencanta referentes aos períodos 1941-1970 e 1971-2000.....	32
Figura 13 – Variação mensal da precipitação máxima diária das séries normais referentes aos períodos 1941-1970 e 1971-2000.....	32
Figura 14 – Variação da precipitação média mensal.	33
Figura 15 – Representação do número de dias mensais com precipitação igual ou superior a 1mm e 10mm.	33
Figura 16 – Resultados do balanço hidrológico aplicado à normal climática de 1941-1970.	34
Figura 17 – Resultados do balanço hidrológico aplicado à normal climática de 1971-2000.	34
Figura 18 – Variação do armazenamento de água no solo nas séries climatológicas de 1941-1970 e 1971-2000.....	35
Figura 19 – Unidades litológicas e fracturação (adaptado de Pato, 2007).	37
Figura 20 – Carta da capacidade de uso do solo da bacia hidrográfica da ribeira dos Covões	39
Figura 21 – Perfil longitudinal da ribeira dos Covões.....	42
Figura 22 - Evolução das subclasses de ocupação do solo, em percentagem,	45

Figura 23 – Uso do solo na bacia hidrográfica da ribeira dos Covões, referente ao ano 2000.	47
Figura 24 - Valores das fracções granulométricas (argila, limo, areia fina e areia grossa) e respectiva classificação textural, a diferentes profundidades do solo (0-2cm, 5-7 cm e 15-17cm), nos locais de monitorização.	50
Figura 25 - Valores médios de densidade aparente do solo (g cm^{-3}) a diferentes profundidades (0-2 cm, 5-7 cm e 15-17cm), nos diferentes locais monitorizados.....	53
Figura 26 – Valores médios da capacidade máxima para a água (pF 0) e da capacidade de campo (pF 2), expressos em percentagem do peso de solo seco, a várias profundidades (0-5 cm, 5-10 cm, 10-15 cm e 15-20 cm), nos diversos pontos monitorizados.....	56
Figura 27 - Valores de pH em H_2O e KCl a diferentes profundidades (0-2cm, 5-7 cm e 15-17cm), nos diferentes pontos monitorizados.	59
Figura 28 - Resultados do teor de matéria orgânica (%) a diferentes profundidades (0-2cm, 5-7 cm e 15-17cm), nos diferentes locais monitorizados.	62
Figura 29 - Valores de humidade médios (%) e desvio padrão, ao longo do tempo, nos vários locais monitorizados.	65
Figura 30 – Evolução semanal da precipitação e temperaturas média e máxima diária, entre Abril e Julho de 2008, com indicação dos períodos de monitorização realizados.	66
Figura 31 - Valores de % de etanol utilizados nos testes de hidrofobia dos solos, ao longo do tempo, nos vários pontos monitorizados.	69
Figura 32 – Variações nas taxas médias de infiltração ao longo do tempo, nos vários ensaios.	72
Figura 33 - Valores médios e desvio padrão de condutividade hidráulica dos vários pontos monitorizados, ao longo do tempo.	74
Figura 34 – Resultados da análise estatística de clusters aos diferentes locais monitorizados.	80
Figura 35 – Precipitação diária ao longo do ensaio e períodos de monitorização das parcelas.	83
Figura 36 – Fotografias das parcelas instaladas para o estudo para os diferentes casos de estudo – Setembro de 2008.....	87
Figura 37 – Valores médios de cobertura do solo nos diferentes os diferentes casos de estudo.....	87

Figura 38 – Valores médios (%) e desvio padrão do teor de matéria orgânica, a diferentes profundidades (0-2 cm e 2-5 cm), nos diferentes casos de estudo.	88
Figura 39 – Valores médios (% v/v) e desvio padrão do teor de humidade do solo, a diferentes profundidades (0-2 cm, 2-4 cm e 5-7 cm), nos diferentes casos de estudo.	90
Figura 40 – Valores médios de hidrofobia a diferentes profundidades (0-2 cm, 2-4 cm e 5-7 cm), nos diferentes casos de estudo.	91
Figura 41 – Valores médios (kg cm^{-2}) e desvio padrão da resistência do solo à torção e penetração, nos diferentes casos de estudo.	92
Figura 42 – Valores médios de escorrência obtidos nos vários ensaios.	93
Figura 43 – Hidrogramas dos diferentes casos de estudo (valores médios).	95
Figura 44 – Valores médios das fracções mineral e orgânica dos sedimentos arrastados no escoamento superficial.	98
Figura 46 – Variações da precipitação média mensal a partir do ano 2005, relativamente ao valor médio observado entre o período 1971-2000.	102
Figura 47 – Variação do caudal médio horário, durante o período de registo do limnigrafo.	104
Figura 48 – Variação diária da precipitação e escoamento superficial ao longo do ano, para o período de registo do limnigrafo.	104
Figura 49 – Relação entre o caudal médio diário (Q_m) e o caudal máximo diário (Q_p) ao longo do ano, para o período de registo de dados do limnigrafo.	105
Figura 50 – Relação mensal entre a precipitação e o escoamento superficial gerado, durante o período de registo do limnigrafo.	106
Figura 51 - Hidrogramas gerados por picos de precipitação múltiplos, em 2 de Fevereiro (esquerda) e 5 de Setembro de 2008 (direita).	108
Figura 52 - Hidrogramas gerados por picos de precipitação isolados, em 18 de Maio (esquerda) e 7 de Outubro de 2008 (direita).	109
Figura 53 - Hidrogramas com maior pico de caudal (esquerda), gerado a 15 de Maio, e com reduzido pico de caudal (direita), registado a 19 de Fevereiro.	110

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Apresentação das características gerais dos pontos de monitorização na bacia.	17
Tabela 2 - Classe de severidade de repelência à água com base no teste MED, segundo a classificação de Lettey (1969) (adaptado de Nunes, 2007).	20
Tabela 3 – Valores de temperatura na estação meteorológica de Coimbra/Bencanta.	31
Tabela 4 – Resultados dos índices climáticos para as séries climatológicas de 1941-1970 e 1971-2000.	36
Tabela 5 – Características do sistema de escoamento da bacia hidrográfica da ribeira do Covões.	41
Tabela 6 – Número de habitantes residente no concelho de Coimbra e nas freguesias	43
Tabela 7 – Variação da representatividade dos diversos sectores de actividade económica, no concelho de Coimbra e nas freguesias pertencentes à área de estudo, entre 1991 e 2001 (Fonte: INE).	44
Tabela 8 – Representatividade das subclasses de uso do solo referentes ao ano 2000.	47
Tabela 9 – Precipitação e escoamento superficial médio medido nas parcelas instaladas.	83
Tabela 10 – Sumário dos resultados obtidos nas simulações de chuva.	95
Tabela 11 – Variação mensal e anual da precipitação e do número de dias com precipitação entre 2005 e Outubro de 2008.	101

Lista de Abreviaturas

AA – área agrícola abandonada

AL – área agrícola lavrada

DF – área desflorestada

F – área florestal

MED – Molarity of na Ethanol Droplet test (teste de Molaridade de uma gota de etanol)

OE – local de obras para construção de estrada

OS – local de obras para instalação do saneamento básico

P1 – floresta dominada por eucalipto

P2 – antigo eucaliptal sujeito a obras de construção civil

P3 – área agrícola (gramíneas), junto a uma linha de água

P4 – terreno abandonado perto de uma estrada

P5 – área de culturas arbóreas (nogueiras)

P6 – terreno abandonado numa zona residencial

P7 – floresta dominada por *Quercus*

P8 – terreno com culturas arbóreas (olival)

P9 – terreno abandonado numa zona residencial

P10 – terreno abandonado numa zona residencial

P11 – floresta dominada por pinhal

P12 – área agrícola (culturas anuais)

P13 – área agrícola (culturas anuais), junto a uma linha de água

1. Introdução

As cheias são fenómenos naturais resultantes de grandes chuvadas, que podem ser descritas como situações de escoamento superficial extremo de água, durante o qual vidas humanas, propriedades e infra-estruturas estão ameaçadas. Todavia, nos últimos anos este fenómeno parece ter-se tornado mais abundante e destrutivo em muitas regiões do globo, o que transparece cada vez mais nos meios de comunicação social.

Apesar das cheias serem particularmente dramáticas fora da Europa, em particular na Ásia e na América do Sul, são consideradas o desastre natural mais comum na Europa (no período entre 1998-2002 as cheias constituíram 43% de todos os desastres) e, em termos de perdas de bens, os mais dispendiosos (COM, 2006). Entre os anos de 1991 e 1995 os custos dos estragos provocados foram estimados em 99 mil milhões de euros (Estrela *et al.*, 2001), enquanto que em 2002 atingiram os 21 mil milhões de euros (Kundzewicz, 2008).

A região Mediterrânica é uma das áreas mais propícias à ocorrência de cheias, facto de certa forma associado ao tipo de clima, que propicia a ocorrência de cheias súbitas, que constituem a maior ameaça à vida humana e infraestruturas. Por exemplo, a 17 de Setembro de 2001, na cidade de Taipei (Taiwan) a ocorrência de uma cheia repentina resultou na morte de 27 pessoas, 3 desaparecidos e 16 feridos e os impactos económicos dos danos materiais foram incalculáveis (Chang *et al.*, 2008).

As cheias e os seus impactes são muitas vezes influenciados pela combinação de factores naturais e interferências humanas, sendo induzidas ou intensificadas, nomeadamente, pelas alterações globais, que consideram as alterações climáticas e do uso do solo (Estrela *et al.*, 2001).

A construção descontrolada, consequência de uma forte pressão urbanística associada ao elevado crescimento demográfico, e a falta de planeamento dos recursos pedológicos e hidrológicos, tem vindo a provocar profundas alterações do ciclo hidrológico, que podem incrementar o risco de ocorrência de inundações (Campana, 1996).

Deste modo, a gestão de episódios chuvosos nas áreas urbanas, caracterizadas pela elevada densidade populacional, constitui um dos desafios da hidrologia urbana e um aspecto de

grande importância para a engenharia, que tem que conceber medidas de protecção das populações contra os efeitos das cheias (Niemczynowicz, 1999).

Objectivos e percurso de investigação

Esta dissertação procura estudar os processos hidrológicos em áreas peri-urbanas sujeitas a um processo de urbanização dinâmico, tendo para tal sido escolhida como área de estudo a Ribeira dos Covões, área suburbana de Coimbra.

Os objectivos específicos consistiram no estudo: 1) das propriedades hidrológicas do solo, através da caracterização físico-química e, avaliação da variabilidade espacial e temporal da humidade, repelência e taxa de infiltração; 2) da influência da cobertura e ocupação do solo nos processos de infiltração e geração de escoamento superficial; e 3) da resposta hidrológica à escala da bacia hidrográfica.

De referir que o trabalho desenvolvido se insere no âmbito do projecto POCI/CLI/60421/2004: “URBHI - Avaliação do risco de cheia e mobilização de poluentes como resultado de alterações globais”, financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

Estrutura do trabalho

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos. No primeiro capítulo (Introdução) é feita a apresentação do tema da dissertação e dos objectivos do trabalho. No segundo capítulo (Estado actual dos conhecimentos), é feito um levantamento do nível de conhecimento sobre os processos hidrológicos, nomeadamente no que respeita às implicações da urbanização e das alterações climáticas. É ainda referida a legislação associada com a temática das cheias na área de estudo e, apresentado o projecto onde se insere o trabalho desta dissertação. Seguidamente é descrita a metodologia adoptada (capítulo 3) para atingir os objectivos propostos, nomeadamente no que respeita à metodologia de campo (monitorização de parâmetros físicos do solo, instalação de parcelas fechadas e simulações de chuva), e de laboratório (para apoio à caracterização físico-química dos solos), bem como de análise dos resultados obtidos. É apresentada a caracterização biofísica da área de estudo, bem como uma avaliação do uso e ocupação do solo ao longo das últimas quatro décadas (capítulo 4). Por fim, apresentam-se os resultados e sua discussão (capítulo 5), seguidos das conclusões finais do trabalho desenvolvido (capítulo 6).

2. Estado actual dos conhecimentos

Desde o início das civilizações, que as populações sempre procuraram fixar-se perto dos rios, lagos, ao longo da costa. A terra adjacente à água oferece normalmente muitas vantagens às povoações, vantagens que inicialmente se prendiam com a sobrevivência e que mais tarde conduziram ao desenvolvimento e industrialização. No entanto, viver no leito de cheia tem algumas desvantagens, das quais a mais óbvia é a constante ameaça de risco de cheia. A cheia ocorre quando o nível da água aumenta ultrapassando os limites naturais ou artificiais ao qual está confinada, submergindo a terra nas áreas envolventes (Franco & Lencastre, 2006).

As maiores forças condutoras que induzem ou intensificam as cheias e os seus impactes incluem as alterações climáticas, impermeabilização do solo, alterações nas bacias hidrográficas e no uso do solo, crescimento populacional, urbanização, construção de estradas e medidas de engenharia hidráulica (Estrela *et al.*, 2001; Fleming & Frost, 2002; Kundzewicz, 2008).

Um tipo particular de cheia são as cheias súbitas (“flash floods”), que surgem rapidamente e podem ocorrer sob um vasto conjunto de condições climatológicas e geográficas. Este tipo de cheias são geradas por precipitações elevadas em áreas relativamente pequenas (<10 km²), sendo muito comuns no Mediterrâneo e em áreas de montanha. Os declives acentuados podem aumentar o potencial para deslizamento de terras, e, em situações excepcionais, a ruptura de canais. As principais características das cheias súbitas são o seu crescimento rápido e elevada velocidade de escoamento, que limitam os procedimentos de aviso às populações e acções de emergência (Estrela *et al.*, 2001; Montz & Grunfest, 2002; Foody *et al.*, 2004; Kirkby *et al.*, 2005).

As incertezas hidrológicas e meteorológicas no que respeita às condições de cheias súbitas continua a apresentar dificuldades, pelo que este fenómeno é ainda pouco estudado, o que se prende também com a falta de dados hidrológicos, que limitam a capacidade de compreensão dos processos de cheia e a utilização deste conhecimento para minimizar ameaças à vida humana e bem-estar (Montz & Grunfest, 2002; Foody *et al.*, 2004).

Os técnicos têm enfrentado o problema de prever as cheias ao longo dos anos e, de um modo geral, tratam este tema de modo subjectivo, concebendo os sistemas de drenagem

intuitivamente para os maiores picos de cheia conhecidos (Fleming & Frost, 2002). Neste sentido, salienta-se a importância da instrumentação das bacias hidrográficas para a aquisição de dados hidrológicos, cuja análise e compreensão constitui uma ferramenta fundamental para o planeamento.

2.1 Ciclo hidrológico

2.1.1 Componentes fundamentais

No ciclo hidrológico, a precipitação representa um importante papel de elo de ligação entre os fenómenos meteorológicos propriamente ditos, e os do escoamento superficial, que mais interessam aos engenheiros, sendo considerada um dado crucial para a modelação hidrológica, na medida em que activa os regimes de caudais.

A precipitação é condicionada por fenómenos meteorológicos locais e globais, dependendo essencialmente da circulação geral da atmosfera. A determinação da intensidade da precipitação é importante para o controle das inundações e a erosão do solo, sendo a queda de precipitação intensa em bacias de pequena dimensão apontada como a principal causa de cheias na área Mediterrânea. Estes curtos mas extremamente intensos eventos chuvosos têm lugar no final do Verão e no Outono (Estrela *et al.*, 2001).

Contudo, a circulação da água na atmosfera depende, para além da precipitação, da sua distribuição no tempo e no espaço e, portanto, do clima e da natureza da cobertura vegetal, que condiciona o processo de evapotranspiração. Neste sentido, salienta-se a importância do revestimento vegetal na análise dos fenómenos hidrológicos principalmente pela sua influência no escoamento superficial e na infiltração, mas também devido ao significativo controlo na evaporação e redistribuição da precipitação incidente. A presença de bosques e florestas favorece a infiltração e reduz a velocidade de escoamento superficial, contribuindo para a redução dos fenómenos de erosão e de ocorrência de grandes cheias, favorecendo ainda o aumento das reservas hídricas subterrâneas (Xiao & McPhearson, 2003; Llorens & Domingo, 2006; David *et al.* 2007).

No entanto, o volume de água que se infiltra no solo depende essencialmente das características do espaço intersticial, associadas ao material do solo, do teor prévio de

água, bem como da ocupação do solo: um solo exposto, principalmente se constituído por materiais mais argilosos, encontra-se muito susceptível à compactação pela água da chuva, pelo que a sua capacidade de infiltração pode ficar muito reduzida; ao contrário, um solo com uma cobertura vegetal encontra-se muito mais protegido desse efeito. Também o ar que preenche os espaços vazios tem que ser desalojado durante o processo de infiltração, o que pode induzir uma diminuição da capacidade de infiltração. Outros factores que afectam a capacidade de infiltração são a compactação pelo homem e animais (diminui), a lavragem de terrenos (aumenta), a ocorrência de geada (diminui) ou a variação da viscosidade dinâmica da água devido à mudança da temperatura ($3\%/^{\circ}\text{C}$, a capacidade de infiltração aumenta com o aumento da temperatura da água, associado à diminuição da viscosidade dinâmica e aumento da condutividade hidráulica) (Oliveira, 2007).

Nas áreas urbanizadas, o aumento da quantidade de água que escoar à superfície do solo é um efeito directo da proliferação da superfície impermeável e da diminuição da absorção para picos de caudal, e que será abordado mais à frente. Todas as propriedades dentro do curso de água contribuem para a escorrência de água. Cada parcela contém diferentes combinações e arranjos de tipos de superfícies impermeáveis, que afectam a quantidade de escorrência produzida e o tempo que demora a ser transportado para outras partes da bacia hidrográfica (Parikh *et al.*, 2005).

Refere-se ainda a importância das características topográficas e geológicas da bacia na inter-relação entre os processos de precipitação/infiltração/escoamento, e que influenciam a forma do hidrograma. De facto, as características topográficas da bacia exercem uma acção modificadora na translação e no armazenamento da precipitação útil na bacia. Os factores predominantes são: a área e a forma da bacia hidrográfica; a densidade da rede fluvial; os declives do terreno e dos cursos de água; e as obstruções à superfície do terreno e nos cursos de água, susceptíveis de provocarem retenção. As características geológicas que influenciam a forma do hidrograma são fundamentalmente as que determinam os escoamentos subsuperficiais e subterrâneos de que resultam, respectivamente, os escoamentos intermédio e de base (Lencastre & Franco, 2006).

O tempo necessário para a formação de uma cheia e a sua duração dependem, assim, das características da bacia hidrográfica em questão. Bacias de pequena dimensão apresentam, geralmente, condições para que uma cheia se forme e propague rapidamente, por vezes em

escassas horas. Pelo contrário, em bacias de grandes dimensões, a ponta de cheia, e as inerentes inundações, demoram mais tempo a instalar-se, permitindo um aviso mais atempado às populações. O regime hidrológico anterior demora também mais tempo a ser restabelecido, podendo levar mesmo vários dias.

2.1.2 Impactes das alterações globais

A previsão das alterações globais (combinação das alterações climáticas e dos usos do solo) e da sua magnitude sobre os recursos hídricos constitui uma das tarefas mais difíceis da ciência moderna (Dam, 1999). Apesar de alguns autores mostrarem que as alterações no uso do solo podem, para além das mudanças climáticas, provocar grandes modificações na evapotranspiração e nos picos de cheia, a urbanização é, provavelmente, o processo que produz maiores impactes na utilização do solo e nas mudanças do clima, aumentando largamente a probabilidade de risco de cheia e alterando o transporte e o destino final dos poluentes (Campana *et al.*, 1996, Ferreira *et al.*, 1998; Brun & Band, 2000).

Alterações de uso do solo

As alterações nos usos do solo estão associadas a alterações nos sistemas hidrológicos e controlo da relação precipitação-escoamento, com o conseqüente impacte no risco de cheia. A desflorestação, a redução de áreas agrícolas, e o aumento da urbanização têm influências adversas na perigosidade das cheias em muitas bacias hidrográficas devido à redução da capacidade de armazenamento de água disponível (em áreas urbanas, os rios são substituídos por tubos), aumento da quantidade de área impermeável (telhados, pátios, estradas, pavimentos, etc.) e no coeficiente de escoamento (Kundzewicz, 2008).

A desflorestação, especialmente nas cabeceiras dos cursos de água, pode produzir um aumento do escoamento superficial. Esta cobertura vegetal tem um efeito muito importante na atenuação de cheias de pequena e média dimensão, principalmente no sul da Europa. O impacto da florestação nos picos de cheia pode depender dos diferentes estágios de desenvolvimento da árvore, dos diferentes tipos de floresta, das diferentes zonas climáticas, dos diferentes tipos de solo e práticas gerais de uso do solo (Estrela *et al.*, 2001).

O abandono agrícola é também um factor bastante importante do ponto de vista hidrológico. De acordo com estimativas, na Europa, 2% do solo agrícola foi perdido para urbanização a cada 10 anos (Kundzewicz, 2008). Autores como Huntingdon & MacDougall (2002), concluíram que, relativamente à hidrologia em zonas agrícolas, a drenagem no subsolo em terrenos argilosos reduz os picos de caudal das cheias para um dado período de retorno, através da criação de um armazenamento prévio na zona do solo. Por outro lado, a drenagem no subsolo em terrenos arenosos aumenta os picos de caudal das cheias, através do aumento da taxa de convergência de água acumulada em solos mais estáveis.

O processo de urbanização provoca a compactação do solo, diminuindo a sua porosidade, e, conseqüentemente, a sua capacidade de infiltração, bem como um incremento na área de superfície impermeável e uma redução das depressões com capacidade de retenção. O escoamento aumenta em proporção com a cobertura de superfície impermeável da bacia, e o aumento de grandes quantidades de escoamento aumenta os picos de descarga e a magnitude das cheias. Aumentos na magnitude das cheias, por sua vez, são maiores para cheias de pequenos períodos de retorno, comparativamente com intervalos de retorno mais longos. Na prática, as alterações referidas traduzem-se, para chuvadas iguais, simultaneamente por um aumento do volume de precipitação útil, por uma redução do tempo de crescimento dos hidrogramas e, como consequência, por um aumento do caudal de ponta (Ward, 1967; Old *et al.*, 2003; Tetzla *et al.*, 2005; White & Greer, 2006).

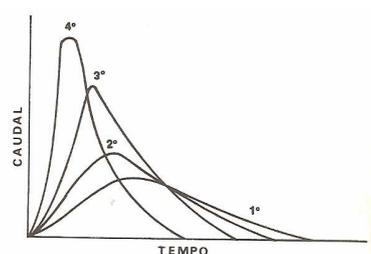


Figura 1 – Modificação do hidrograma unitário devido à urbanização progressiva da bacia (Lencastre & Franco, 2006).

Nas cheias em bacias hidrográficas predominantemente rurais, os caudais crescem mais lentamente, atingindo picos de cheia numa escala temporal de horas ou dias, e o escoamento significativo ocorre durante o Inverno, quando o solo se encontra à capacidade de campo, impedindo a infiltração de água à superfície.

Contudo, em bacias impermeabilizadas pela urbanização, a humidade antecedente é um aspecto menos relevante, e elevados caudais são normalmente gerados durante intensas precipitações de Verão. Em bacias densamente urbanizadas, o tempo de resposta é reduzido porque o escoamento atinge grande velocidade sobre superfícies ligeiramente impermeáveis, por diminuição da resistência à água das superfícies sobre as quais se escoam, antes de entrar no sistema de drenagem artificial, que aumenta efectivamente a densidade de drenagem e a taxa de convergência (Old *et al.*, 2003; Lencastre & Franco, 2006). Já em 1967, Ward considerou que o aumento na magnitude dos picos de cheia era o resultado de um aumento do volume de escoamento rápido e do mais acelerado movimento da escorrência que é possível numa área urbanizada. De acordo com este autor, o desenvolvimento urbano no Texas e em outros locais, provocou picos de descarga que foram entre 100% a 300% maiores que todos os de áreas em desenvolvimento.

De modo a tentar minimizar o impacto do aumento de escoamento superficial provocado pela impermeabilização do solo, têm vindo a ser construídos, nomeadamente, diques para transporte de excesso de caudal perto dos canais naturais. Contudo, os trabalhos de engenharia hidráulica que têm vindo a ser levados a cabo para mitigar os efeitos das cheias numa área podem aumentar a velocidade de propagação das águas e, conseqüentemente, incrementar o risco de cheia a jusante (Estrela *et al.*, 2001; Huntingdon & MacDougall, 2002; Rickard, 2002).

Assim, quando se estuda o ciclo hidrológico urbano é ainda necessário ter em consideração as estruturas de saneamento e drenagem, que influenciam o padrão de escoamento (Estrela *et al.*, 2001; Foster, 2001). A rede de drenagem de águas superficiais recebe escoamento superficial proveniente de telhados e estradas. A colmatação de valas e trincheiras, responsáveis pela drenagem de águas pluviais, com materiais de textura grosseira (areia ou pedras) deve também ser considerado. O armazenamento de água na rede de drenagem é enorme ao nível do solo e em extensas áreas inundáveis. Todos estes parâmetros influenciam a duração da cheia, bem como o tempo de convergência para o curso de água principal (Estrela *et al.*, 2001; Berthier *et al.*, 2004; Ramier & Andrieu, 2004).

Alterações climáticas

Desde o final do século XIX que a temperatura média à superfície aumentou aproximadamente 0,6°C (Santos & Miranda, 2006). Esta subida proporciona um aumento nas taxas de evaporação e, o conseqüente transporte de maiores quantidades de vapor de água na atmosfera. Como conseqüência, assume-se que o ciclo hidrológico global está a ser acelerado, especialmente no que respeita a eventos hidrológicos extremos como são as cheias (Menzel *et al.*, 2002).

Alterações no conteúdo de humidade atmosférico ou na circulação afectam os padrões de precipitação, podendo provocar alterações na distribuição, intensidade e duração de eventos extremos de precipitação (Figura 2), e uma maior frequência de precipitação intensa (Telford, 2002; Kundzewicz, 2008).

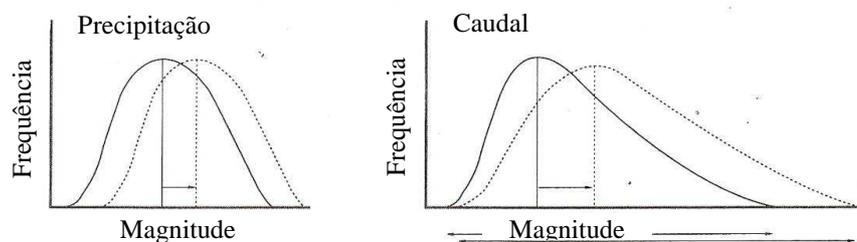


Figura 2 – Impacto das alterações da precipitação, como resultado das alterações climáticas, no hidrograma de cheia (adaptado de Telford, 2002).

Estas alterações irão afectar o caudal nos cursos de água e a recarga de aquíferos, mas a que nível, irá depender da quantidade de alteração e do tipo de bacia. As alterações no regime de chuvas podem ter um impacte significativo na produção de escorrência superficial (Arnell, 1996; Ferreira *et al.* 1998; Najjar, 1999). No entanto, estas alterações na precipitação útil podem ser profundamente influenciadas pelas alterações ao uso do solo (Ferreira *et al.*, 1998).

Outro importante efeito das alterações climáticas, para além da alteração dos padrões de precipitação, é o impacto do crescente aumento da temperatura na estrutura da vegetação, que pode afectar as propriedades do solo e a sua capacidade de retenção, e, conseqüentemente, o escoamento (Estrela *et al.*, 2001). Por outro lado, o aquecimento global pode ainda afectar as propriedades do solo, e conseqüentemente perturbar os processos de geração de escoamento superficial. Temperaturas mais elevadas e maior precipitação conduzirão a uma perda de matéria orgânica do solo e, conseqüentemente, a uma diminuição da capacidade do solo para reter humidade. As alterações nas

propriedades do solo irão ocorrer num longo período de tempo, pelo que os seus efeitos irão ser sentidos principalmente em pequenas bacias hidrográficas (Arnell, 1996).

Com o objectivo de aprofundar o estudo do impacto das alterações globais no clima urbano e no ciclo hidrológico, surgiu o projecto URBHI, no âmbito do qual se desenvolveu este trabalho. O objectivo final deste projecto é utilizar modelos hidrológicos e de erosão que permitirão a integração das alterações de uso do solo com as alterações climáticas provocadas pelo crescimento urbano, de modo a desenvolver linhas gerais de gestão de risco e propor alterações ao nível das políticas, programas e planos, que minimizem o risco de cheia e de poluição.

2.2 Enquadramento legal

Com a tomada de consciência relativa à importância da gestão da água, a União Europeia e Portugal têm, ao longo dos anos, desenvolvido diversas medidas legais com os objectivos de protecção e gestão dos recursos hídricos, tentando amenizar a pressão crescente a que estão sujeitos, com vista, nomeadamente, a prevenir e minimizar os riscos e impactes das cheias. Neste âmbito foi realizado um levantamento da evolução de toda a legislação publicada desde 1971, apresentado no Anexo I, apelando-se aqui neste subcapítulo apenas, de forma sintética, à mais importante e actual.

Assim, começamos por fazer referência ao Decreto-Lei 364/98, de 21 de Novembro, que define o actual regime público hídrico, e onde se estimula a adopção de medidas não estruturais específicas para áreas urbanas, com o objectivo de travar os processos de desenvolvimento urbanístico desatentos ao risco de cheia. Este regulamento institui que as Câmaras procedam à delimitação das áreas (urbanas ou urbanizáveis) vulneráveis ao risco de inundação, numa tentativa de articulação com outros planos de ordenamento.

Com o objectivo de definir orientações de valorização, protecção e gestão equilibrada da água, de âmbito territorial, surgiram os Planos de Bacia Hidrográfica (PBH), dos quais se refere o relativo à bacia hidrográfica do Mondego (Decreto Regulamentar n.º 9/2002), que abrange a área de estudo alvo desta dissertação (Ribeira dos Covões, localizada na periferia da cidade de Coimbra), e pelo qual se rege a sua gestão hídrica. No PBH do Mondego foi

efectuada a caracterização da situação de referência e, em particular das situações hidrológicas extremas e de risco, com destaque para as cheias e as secas. Neste âmbito foi realizada uma análise de cheias, que compreendeu a identificação das zonas críticas de inundação, que correspondem à zona do Baixo Mondego, e a caracterização dos caudais de ponta e volumes das cheias. São ainda apresentados programas de medidas associadas aos objectivos estratégicos como sejam a prevenção e minimização dos efeitos das cheias, indicando normas orientadoras relativas, nomeadamente, aos objectivos de protecção contra cheias e inundações, bem como ao inventário e delimitação das zonas de risco de inundação.

A partir do ano 2000, a União Europeia apresentou um papel preponderante na publicação de diversas Directivas no âmbito da água, transpostas para o direito interno de cada Estado Membro. Assim, menciona-se a Directiva 2000/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de Outubro de 2000, comumente conhecida como Directiva-Quadro da Água, e recentemente transposta para a ordem jurídica nacional pela Lei 58/2005, de 29 de Dezembro. Esta Directiva estabelece um conjunto de princípios essenciais a cumprir no âmbito comunitário sobre os recursos hídricos e define estratégias e normas que visam nomeadamente a preservação da rede hidrográfica e a valorização do meio hídrico, numa perspectiva com os diversos instrumentos de planeamento e gestão do território, não considerando, contudo, a redução dos riscos de inundações como objectivo principal.

Relativamente a legislação mais específica para prevenção e redução eficazes das inundações, foi apresentada a Directiva 2000/60/CE, que define os princípios internacionais de gestão dos riscos de inundações, e a Directiva 2007/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de Outubro de 2007, relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações, e que tem como objectivo reduzir e gerir o risco que as cheias provocam para a saúde humana, ambiente, infra-estruturas e propriedades. Na sequência desta Directiva comunitária, surgiu a nível nacional a Resolução da Assembleia da República n.º 15/2008 de 21 de Abril, onde se propõe a elaboração de um relatório sobre as principais situações de risco de inundações, com a identificação das linhas de água problemáticas, de relatórios posteriores de actualização das situações de risco e de progresso da estratégia de prevenção. Com base nesta avaliação, pressupõem-se a elaboração de um Plano Nacional de Redução do Risco de Inundações.

3. Metodologia

A metodologia que se apresenta neste capítulo subdivide-se em quatro partes principais: a primeira relaciona-se com a caracterização da área de estudo seleccionada, seguidamente apresenta-se a metodologia de campo desenvolvida, e os métodos analíticos de apoio, utilizados para caracterização de propriedades físico-químicas do solo, e uma última parte que se refere ao tratamento estatístico dos dados obtidos.

A Figura 4 apresenta de uma forma esquemática a metodologia adoptada para a realização deste trabalho.

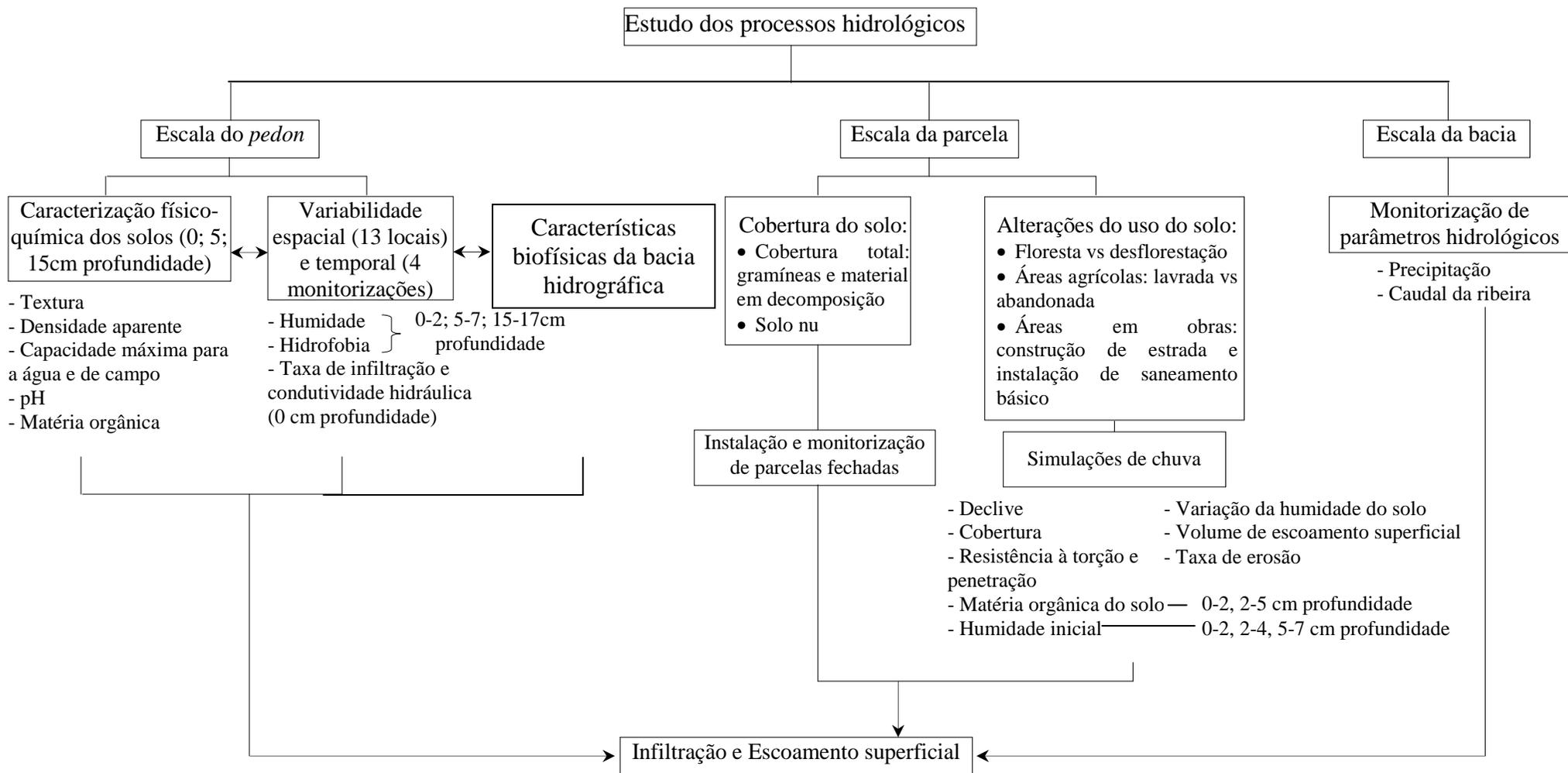


Figura 3 – Representação esquemática da metodologia utilizada na realização deste trabalho.

3.1 Selecção e caracterização da área de estudo

A área de estudo seleccionada foi a bacia hidrográfica que abrange a Ribeira dos Covões, localizada na região Centro de Portugal, próximo da cidade de Coimbra (Figura 4). A sua escolha teve em consideração as suas características de área peri-urbana, que têm fomentado um processo contínuo de urbanização e construção de infra-estruturas e equipamentos, sobretudo nas últimas três décadas, bem como a sua dimensão física (cerca de 7 km²)

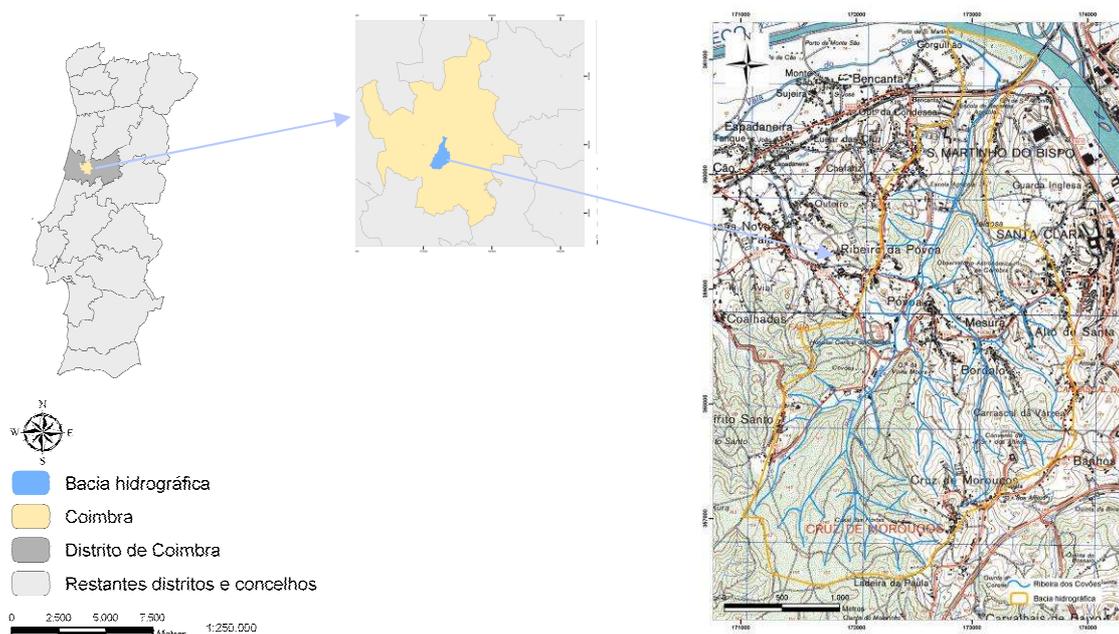


Figura 4 – Localização da área de estudo.

A escolha da bacia hidrográfica como escala de trabalho baseou-se na sua importância, tendo em consideração que os processos hidrológicos se desenvolvem a esta dimensão, uma vez que, toda a precipitação que cai nesta área converge para um mesmo ponto. De acordo com Santos (2004) a bacia hidrográfica constitui ainda, uma unidade espacial de planeamento de fácil reconhecimento e caracterização.

A caracterização biofísica da área de estudo foi efectuada através do levantamento da informação disponível, quer em termos bibliográficos, cartográficos, dados estatísticos recolhidos pelo Instituto Nacional de Estatística, quer através de fotografias aéreas publicadas.

No que respeita à morfologia, variável que contempla a hipsometria, o declive e a exposição solar, a sua análise teve por base o tratamento das cartas em formato digital da altimetria e hidrografia, do Instituto Geográfico do Exército (IGE) em formato vectorial, georreferenciadas, e referentes à Série M888, na escala 1:25000, através do software ArcGIS 9.1. Esta ferramenta informática permitiu também proceder à análise geométrica da ribeira dos Covões. O estudo do sistema de escoamento na bacia hidrográfica baseou-se na hierarquização dos cursos de água proposta por Strahler.

No âmbito da caracterização climática, foi efectuada a descrição de alguns elementos climáticos, dando especial importância à precipitação, com base em duas séries normais de dados (1941-1970 e 1971-2000), da estação meteorológica de Coimbra/Bencanta, localizada nas imediações da área de estudo (40°13'N de latitude, 8°27'W de longitude e 35m de altitude). Para estas séries de dados foi ainda aplicada a classificação de Thornthwaite para o cálculo de alguns índices climáticos, bem como o método de Thornthwaite-Matter para o cálculo do balanço hídrico do solo, considerando o método de Thornthwaite para o cálculo da evapotranspiração potencial.

Os dados disponíveis permitiram ainda a caracterização sócio-económica da área de estudo a partir de 1890, e o estudo da evolução do uso do solo entre os anos de 1958 e 2002. O mapa de uso do solo actual foi obtido através da carta Corine Land Cover do ano 2000, fornecidas pelo Instituto do Ambiente, por processamento com o software ArcGIS 9.1.

3.2 – Metodologia de campo

A metodologia de campo definida tem como principal objectivo o estudo dos processos de infiltração e escoamento superficial na bacia em estudo, ao longo do tempo. Deste modo, considerou-se a caracterização físico-química dos solos e a monitorização de parâmetros físicos ao longo do tempo (humidade, hidrofobia, infiltração e condutividade hidráulica); a instalação de parcelas fechadas para monitorizar o escoamento superficial gerado em solos com diferentes coberturas e, a realização de simulações de chuva para avaliar a capacidade de infiltração em áreas com diferentes tipos de intervenção humana.

Numa primeira etapa foram efectuadas visitas de reconhecimento da área de estudo e analisados os dados da caracterização biofísica da bacia, de modo a estabelecer critérios de orientação para a escolha dos locais de monitorização e instalação de equipamentos.

Foi ainda necessário proceder à manutenção dos equipamentos já existentes para monitorização da precipitação (pluviómetro instalado em 2001) e do nível de água da ribeira dos Covões - limnígrafo com funcionamento por sistema de bóia e contra-peso, instalado em 2005 (Figura 5).



Figura 5 – Limnígrafo utilizado para monitorização da altura de água na ribeira dos Covões.

3.2.1 Monitorização de parâmetros físico-químicos do solo

De modo a avaliar a evolução do teor de humidade, hidrofobia, taxa de infiltração e condutividade hidráulica do solo, foram seleccionados 13 pontos na área da bacia hidrográfica em estudo tendo em consideração a ocupação do solo e a distância às linhas de água, bem como as condições de acesso. As características dos locais seleccionados são apresentadas na Tabela 1 e, localizadas na bacia hidrográfica da Ribeira dos Covões na Figura 6.

Tabela 1 – Apresentação das características gerais dos pontos de monitorização na bacia.

Local	Uso do solo	Litologia	Declive (%)	Exposição solar
P1	Área florestal, essencialmente dominada por eucalipto	Depósitos superficiais	3,4	Oeste
P2	Antigo eucaliptal que foi cortado e onde se procedem actualmente a obras para a construção de um parque tecnológico	Depósitos superficiais	3,1	Oeste
P3	Área agrícola (gramíneas)	Depósitos aluvionares	2,9	Oeste
P4	Terreno abandonado, próximo a uma estrada	Depósitos aluvionares	0,0	Sem exposição
P5	Terreno com culturas arbóreas (nogueiras)	Depósitos aluvionares	8,1	Norte
P6	Terreno abandonado numa zona residencial	Unidade calco-margosa	0,7	Sem exposição
P7	Área florestal, dominada essencialmente por <i>Quercus</i>	Unidade calco-dolomítica	0,0	Sem exposição
P8	Terreno com culturas arbóreas (olival)	Unidade calco-dolomítica	22,8	Norte
P9	Terreno abandonado numa zona residencial	Unidade calco-dolomítica	15,4	Norte
P10	Terreno abandonado numa zona residencial	Depósitos superficiais	13,6	Sul
P11	Área florestal, dominada essencialmente por pinhal	Unidade calco-dolomítica	18,4	Oeste
P12	Área agrícola (culturas anuais)	Unidade calco-margosa	0,0	Sem exposição
P13	Área agrícola (culturas anuais)	Depósitos aluvionares	0,5	Sem exposição

Em cada um dos pontos seleccionados, o teor de humidade e a hidrofobia foram monitorizados a 3 profundidades diferentes: 0-2cm, 5-7cm e 15-17cm, com o objectivo de estudar diferenças entre o horizonte orgânico, horizonte superficial e subsuperficial (também designado por eluvial) dos solos minerais, respectivamente. Contudo, a monitorização da velocidade de infiltração e condutividade hidráulica, foram apenas avaliadas na camada superficial do solo, uma vez que esta é a camada mais limitante do ponto de vista hidrológico (Costa, 1999). No total foram realizadas 4 campanhas de monitorização, com o objectivo de avaliar as variações após episódios chuvosos em diferentes épocas do ano, durante 2008: 25 e 26 de Abril, 22 e 23 de Maio, 21 e 22 de Junho e ainda 30 e 31 de Julho.

Na campanha de monitorização realizada em Maio, foram ainda recolhidas amostras em cada local, às diferentes profundidades monitorizadas (0-2cm, 5-7cm e 15-17cm), para determinação de algumas propriedades físico-químicas: densidade aparente, capacidade de retenção de água, análise mecânica, teor de matéria orgânica e pH. Estes parâmetros foram seleccionados na medida em que diversos autores os relacionam com a capacidade de infiltração de água no solo e, conseqüentemente, com os processos hidrológicos.

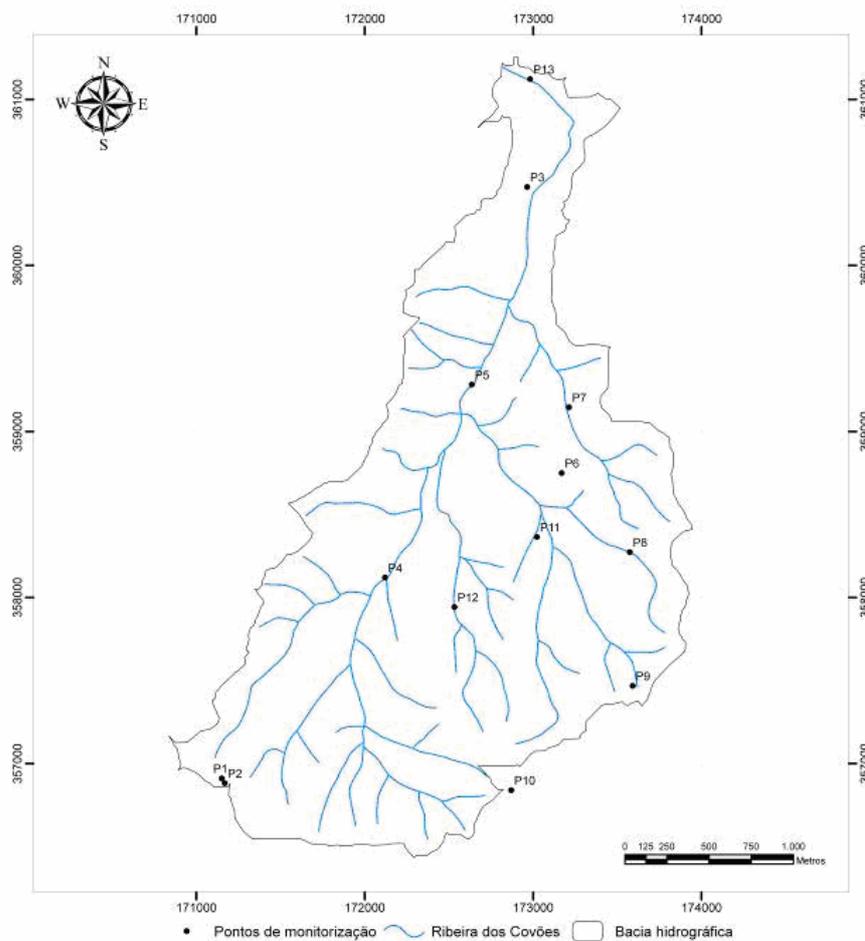


Figura 6 - Localização dos pontos de monitorização do solo.

Teor de humidade

A humidade do solo é um dos principais elementos do ciclo hidrológico interferindo nos processos de infiltração e escoamento superficial e, por conseguinte, na erosão dos solos (Cerdà, 1997; Doerr *et al.*, 2000; Nunes, 2007).

A avaliação do teor de humidade do solo foi monitorizado com recurso a um sensor do tipo “Time domain reflectometry” (TDR), cujo funcionamento se baseia na forte correlação

observada entre a permissividade dieléctrica do solo húmido e o seu conteúdo volumétrico de água. Segundo Greco & Guida (2007), este método promove uma fácil e barata estimativa do conteúdo em humidade com pouca perturbação do solo, pelo que tem vindo a ser largamente utilizada nas últimas décadas para a monitorização deste parâmetro.

O TDR utilizado foi da marca TRIME-FM. Tendo em consideração a grande variabilidade do teor de humidade no solo, foram efectuadas 15 leituras de humidade em cada local. Contudo, durante a segunda campanha de monitorização, o aparelho revelou problemas técnicos, pelo que foi necessário passar a determinar-se o teor de humidade em laboratório.

Hidrofobia

A hidrofobia do solo é uma propriedade edáfica físico-química, em que as forças coesivas das moléculas de água são mais fortes que as forças de aderência entre as moléculas de água e as partículas do solo (Wessel, 1988). Neste contexto, a hidrofobia é sinónimo de repelência à água, processo que reduz de tal modo a afinidade do solo com a água, que resiste à molha por períodos que variam entre alguns segundos, umas horas, dias ou semanas (King, 1981; Doerr & Thomas, 2000). Esta característica dos solos pode ter notáveis consequências do ponto de vista hidrológico (Ferreira, 1996; Doerr *et al.*, 2000; Ritsema, 1998; Matias, 2002; Nunes, 2007).

De entre os vários métodos destinados a detectar e medir o grau de hidrofobia do solo, seleccionou-se o *Molarity of Ethanol Droplet* (MED) (Teste da Molaridade com Etanol) devido à sua rapidez e facilidade de aplicação em trabalho de campo. Este teste consiste na adição de sucessivas misturas de água destilada com etanol em concentrações crescentes (Tabela 2) até que a gota demore menos de 5 segundos a infiltrar-se (Doerr *et al.*, 2000). O princípio desta mistura baseia-se no facto de que o álcool etílico diminui a tensão superficial das gotas e facilita a sua infiltração. Assim, se se aumentar a concentração de etanol e, portanto, diminuir a tensão superficial do sistema água-etanol num dado momento, as gotas do sistema deixam de ser repelidas pela superfície do solo, uma vez que as forças de coesão passam a ser inferiores às forças de adesão. A concentração mínima de etanol que supere a repelência equivale ao valor da severidade (Letey, *et al.*, 2000).

Tabela 2 - Classe de severidade de repelência à água com base no teste MED, segundo a classificação de Lettey (1969) (adaptado de Nunes, 2007).

Concentração de etanol (% volumétrica)	Volume de etanol (70%) ml	Volume de água destilada (ml)	Classe de severidade de repelência à água
0	0	100	Hidrofílico
1	1	69	Ligeiramente hidrofóbico
3	1	22	Ligeiramente hidrofóbico
5	2	26	Ligeiramente hidrofóbico
8,5	3	22	Fortemente hidrofóbico
13	5	22	Fortemente hidrofóbico
18	8	23	Severamente hidrofóbico
24	10	19	Severamente hidrofóbico
36	20	19	Extremamente hidrofóbico

De modo a realizar o teste na camada superficial do solo, foi necessário limpar delicadamente a sua superfície, removendo os restos de matéria orgânica e pedras, com o objectivo de atingir o solo nu.

Infiltração e condutividade hidráulica

A velocidade de infiltração de água no solo e a condutividade hidráulica são importantes factores nos processos hidrológicos. A sua determinação no campo foi conseguida com recurso a infiltrómetros do tipo MiniDisk, da marca Decagon Devices. Este equipamento, cujo princípio de funcionamento se descreve no Anexo II, é colocado sobre a superfície do solo, sendo necessário garantir o bom contacto entre a membrana e o solo. Durante o ensaio é registado o tempo de demora a infiltração de cada mililitro de água no solo.

A selecção deste método teve em consideração, para além da facilidade de transporte e realização dos ensaios no campo, o facto de se minimizar a perturbação da superfície do solo, visto que, segundo Zimmermann *et al.* (2005) a infiltração e a condutividade hidráulica saturada são variáveis relativamente sensíveis à perturbação do solo.

3.2.2 Parcelas fechadas

O recurso a parcelas experimentais fechadas para obtenção de informações hidrológicas tem sido bastante utilizado (Ferreira, 1996; Nunes, 2007; Prats, 2007). Deste modo, as parcelas de escoamento superficial instaladas, têm por objectivo avaliar as diferenças na geração de escoamento em solos com diferentes coberturas, durante eventos chuvosos: cobertura total de vegetação (numa área ajardinada) e manta morta (área de mata de carvalhos), solo nu.

As parcelas instaladas apresentam uma área aproximada de 0,15 m², delimitada por chapa de zinco (com 15 cm de altura) enterrado no solo (± 5 cm). As diversas lâminas que constituem a parcela ficam sobrepostas uns 10 cm para evitar fugas, e as uniões entre elas foram seladas com silicone. Apresenta uma configuração rectangular, disposta no sentido do declive e, na sua parte terminal, tem uma forma afunilada que ostenta uma abertura de 2,5cm de diâmetro, com vista à convergência e saída da água. A água que escorre superficialmente é armazenada em recipientes localizados a uma cota inferior, sendo conduzida com auxílio de uma mangueira.

A instalação das parcelas foi realizada em duplicado, em áreas relativamente próximas (distância máxima entre os diferentes ensaios de 400m) e com declive semelhante. No decurso deste processo houve a preocupação de minimizar as perturbações no solo, de modo a reduzir ao máximo as alterações na superfície do solo, susceptíveis de influenciar os resultados. A sua monitorização consistiu basicamente na medição do volume de escorrência recolhido num sistema colector. Uma vez que o processo de recolha dos dados foi efectuado na sequência de episódios chuvosos, com vista á minimização dos efeitos de evaporação, manifestou por isso um carácter aleatório.

Tendo em consideração a reduzida dimensão das parcelas instaladas, seleccionada em função da disponibilidade de material e de recursos humanos disponíveis para a sua instalação, considera-se que os resultados experimentais devem funcionar como meros indicadores entre as coberturas estudadas, tendo por objectivo comparar as diferentes magnitudes do escoamento em função da cobertura do solo.

3.2.3 Simulações de chuva

Com o objectivo de quantificar o escoamento superficial e as perdas de solo associadas (sedimentos em suspensão), em locais com diferentes intervenções humanas, foram realizados ensaios de simulação de chuva.

A selecção deste método prende-se com o facto de se prescindir de chuva natural, conseguindo um maior controlo sobre o ensaio, bem como a réplica das mesmas condições em diferentes locais. Deste modo, é possível comparar distintas partes de uma bacia de drenagem, devido ao controlo das características da precipitação, facilitando o desenvolvimento da investigação. De referir que a realização de simulações de chuva permite a obtenção de parâmetros hidráulicos e de degradação física do solo num período de tempo relativamente curto (Clarke & Walsh, 2007). Contudo, com esta técnica, não se pretende substituir outras metodologias, realizadas com chuvas naturais, mas somente complementar e antecipar a diversidade de informação que se pode recolher através desta metodologia.

A maior desvantagem dos simuladores de chuva é a sua pequena escala espacial de operação. Apesar de também existirem simuladores de larga escala, a sua utilização não é prática, e as dificuldades no seu transporte dificultam a sua utilização no campo, em áreas por vezes com acessos difíceis. Por outro lado, é muitas vezes complicado conseguir simular as características de uma chuva natural, especialmente no que respeita à energia cinética das gotas (Prats, 2007).

Construção e calibração do simulador

O simulador utilizado é do tipo pulverizador, e foi construído segundo o modelo de Cerdà *et al.* (1997), considerando algumas modificações sugeridas pelo Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

O simulador de chuva (Figura 7) é constituído por uma armação quadrangular, apoiada num suporte extensível que confere ao simulador uma altura de 2 metros sobre a superfície do solo, e um jogo de bicos da marca Hardi (por onde sai a água, e onde é colocado o “nozzle”), instalado no centro da armação. A colocação de dois fios-de-prumo permite a instalação horizontal do “nozzle”. Entre o circuito de ligação do “nozzle” e o sistema de fornecimento de água,



Figura 7 – Simulador de chuva.

promovido por 2 bombas manuais (da marca Ossatu, com capacidade para 6 litros cada), existe um manómetro que controla a pressão (instalado mais próximo do “nozzle”). Esta deve ser constante durante todo o ensaio de modo a que intensidade da chuva seja também fixa. A estrutura é envolvida por uma cortina plástica para evitar a interferência do vento na direcção da queda das gotículas de chuva. No intuito de facilitar a recolha de escoamento superficial durante os ensaios, considerou-se a instalação de parcelas rectangulares com a extremidade afunilada, com uma área de cerca de $0,15 \text{ m}^2$ (de acordo com o procedimento descrito para a instalação de parcelas fechadas, acima apresentado).

Após a construção do simulador foi necessário proceder à sua calibração, com o objectivo de reproduzir eventos extremos, com uma intensidade de precipitação de 45 mm h^{-1} . A selecção desta intensidade está associada ao facto de, segundo Prats (2007), traduzir a precipitação máxima de uma hora, para cheias com um período de retorno de 100 anos, na Serra do Caramulo, localizada a cerca de 83 km da área de estudo. Esta intensidade de precipitação foi ainda utilizada por outros investigadores em áreas de estudo localizadas na região centro de Portugal (Walsh *et al.*, 1999; Coelho, 2002; Ferreira *et al.*, 2007, Prats, 2007).

O processo de calibração baseou-se no ajuste da pressão para atingir os valores de intensidade de precipitação desejada e, na selecção do “nozzle” que proporciona a melhor distribuição da precipitação. Para tal recorreu-se a um sistema de copos (39 copos instalados no interior da parcela e 6 no exterior), com vista à análise da intensidade e distribuição espacial da precipitação. Os ensaios realizados tiveram a duração de dez, quinze e sessenta minutos.

A partir dos valores registados em cada um dos recipientes, foi determinado o Coeficiente de Christiansen ($Christ. = (1 - (\text{Desvio Padrão}/\text{Média})) \times 100$) para avaliar a distribuição da precipitação, tendo-se admitido a rejeição de todas as calibrações com coeficientes inferiores a 70% (Prats, 2007). Admite-se como valor da intensidade, o valor médio ponderado dos trinta e nove copos dentro da parcela.

Após a selecção da pressão e do “nozzle” a utilizar no simulador de chuva, procedeu-se ao estudo do diâmetro e velocidade das gotas, e respectiva energia cinética, através de um distrómetro, que é um medidor de precipitação a laser (LPM), da marca Thies (Anexo III), proporcionado pelo Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra.

A calibração do simulador, operado com uma pressão de 2,0 bar, instalado a uma altura de 2m do solo e operado com o “nozzle” seleccionado, revelou uma intensidade de precipitação de $43 \pm 3 \text{ mm h}^{-1}$, associada a um coeficiente de Christiansen de $83 \pm 6\%$. A energia cinética (E_c) foi calculada, através do valor da intensidade de precipitação pela fórmula proposta por *Wischmeier & Smith*: $E_c = 13,32 + 9,78 \log_{10} I$, com I em mm. Deste modo, determinou-se que a chuva simulada pelo equipamento desenvolvido apresenta uma energia cinética média de 29 J m^{-2} . De acordo com os resultados do LPM, o diâmetro mediano em número (D50) das gotas de chuva simuladas é 1,0mm. As gotas de chuva fornecidas pelo simulador apresentam uma velocidade terminal média de $1,9 \text{ m s}^{-1}$ (estes resultados são apresentados de forma mais detalhada no Anexo III).

Localização e caracterização das parcelas

As simulações de chuva visaram o estudo de processos hidrológicos em diferentes situações que ocorrem na bacia, tendo sido seleccionados os locais em função dos objectivos:

- Estudar, numa área com características biofísicas semelhantes, as diferenças entre uma floresta preservada e uma floresta recentemente cortada;
- Analisar as diferenças entre áreas agrícolas, em zonas lavradas e abandonadas;

- Compreender as implicações da realização de obras, como sejam a construção de estradas e a instalação de saneamento básico.

A localização das parcelas foi feita da forma aleatória, tentando não se dar preferência a locais homogêneos e de fácil instalação. Contudo, pormenores no micro-relevo forçaram algumas vezes à selecção do local, visto que a presença de pedras e raízes tornam bastante difícil a instalação das parcelas. A instalação das parcelas considerou os mesmos materiais e procedimentos referidos para a instalação das parcelas fechadas, acima apresentados.

Antes de se iniciar cada uma das simulações de chuva, procedeu-se à quantificação do declive com auxílio de um clinómetro e, à descrição visual da cobertura do solo no interior da parcela. Numa área não alterada nas proximidades de cada parcela, foram efectuadas uma dezena de medições com um penetrómetro de bolso e um *turvane*, de forma a quantificar a resistência do solo à penetração e à torção. Com o objectivo de analisar a hidrofobia do solo foi utilizado o teste MED, anteriormente apresentado, a diferentes profundidades: 0 cm, 2 cm e 5 cm. A selecção destas profundidades baseou-se nas conclusões de alguns autores, que referem que os primeiros 5 cm de solo são fundamentais nos processos hidrológicos e de erosão (Ferreira, 1996; Walsh *et al.*, 1998; Matias, 2002; Nunes, 2007). Para estas profundidades foram ainda recolhidas amostras de solo com o objectivo de determinar a humidade inicial, densidade aparente e teor de matéria orgânica.

Realização dos ensaios

A duração de cada ensaio foi de 1 hora com o objectivo de assegurar a geração de um escoamento superficial estável (Nunes, 2007). Durante o ensaio foi monitorizado o teor de humidade do solo num ponto da parcela, com recurso a uma sonda TDR TRIME – FM, a cada minuto. O tempo ao qual se inicia o escoamento superficial foi registado, e, a partir deste momento, recolhido e quantificado o escoamento a cada 15 minutos. As amostras de escoamento foram posteriormente encaminhadas para o laboratório, onde foram filtradas e secas a 105°C, para determinação do teor de sedimentos totais, e posteriormente incineradas a 550°C para avaliação do teor de matéria orgânica.

O momento de cessação do escoamento foi também registado, e indica o tempo que decorre entre o término da precipitação e a finalização do escoamento na saída da

microparcela (considerou-se “sem escorrência” quando caíam menos de três gotas por segundo). Após cada experiência, procedeu-se à abertura do perfil do solo, na parte central da parcela, até à profundidade necessária para visualizar a frente de humidade.

3.3 Metodologia laboratorial

A metodologia laboratorial foi utilizada com o objectivo de estudar parâmetros físicos (análise mecânica, densidade aparente, humidade e capacidade de retenção de água) e químicos (teor de matéria orgânica e pH) do solo, susceptíveis de influenciar a resposta hidrológica, pelo que serviu como uma ferramenta complementar à metodologia de campo.

De referir que todas as análises foram realizadas no Laboratório de Solos da Escola Superior Agrária de Coimbra, seguindo os procedimentos aí adoptados para determinação das variáveis em causa. As variáveis analisadas e os métodos utilizados apresentam-se na sequência.

3.3.1 Recolha e preparação de amostras

A quantidade e o procedimento de recolha de amostras são função dos parâmetros a analisar. Neste sentido, salienta-se a necessidade de recolha de amostras não perturbadas para a determinação da densidade aparente e capacidade de retenção de água, com recurso a um anel de dimensões conhecidas (5,4 cm de diâmetro e 2,95 cm de profundidade). Para a determinação dos parâmetros pH, matéria orgânica e análise mecânica, foi necessário preceder à preparação das amostras.

A preparação das amostras consistiu na secagem à temperatura ambiente e, separação da terra fina (partículas com diâmetro inferior a 2mm) dos chamados elementos grosseiros (restantes partículas), com recurso a moagem mecânica. As análises laboratoriais foram efectuadas na fracção denominada por terra fina.

3.3.2 Humidade

Como o aparelho portátil utilizado no campo para determinação da humidade revelou problemas e deixou de poder ser utilizado, foi necessário passar a proceder à análise do

teor de humidade no laboratório. Este parâmetro determina-se por secagem em estufa a 105°C até peso constante.

3.3.3 Densidade aparente

As amostras de solo são recolhidas em anéis de dimensões conhecidas e posteriormente secas a 105°C. A densidade aparente, expressa em g cm^{-3} , é determinada pela razão entre a massa de amostra e o volume ocupado.

3.3.4 Matéria orgânica

A determinação do carbono orgânico foi obtida através da determinação do dióxido de carbono libertado pela combustão de uma amostra de um grama a 1200°C, efectuada num aparelho da marca Strohlein Instruments (Leco sc-144DR). O teor de matéria orgânica foi calculado através da multiplicação do teor de carbono orgânico pelo factor 1,724, geralmente aceite, considerando que a percentagem média de carbono dos compostos orgânicos do solo é de 58% (Costa, 1999; Oliveira, 2005).

3.3.5 Análise mecânica

A análise mecânica ou granulométrica foi efectuada na fracção de solo inferior a 2mm, utilizando o método internacional de análise mecânica, que permite obter a distribuição percentual das partículas individuais do solo em função do seu tamanho.

O procedimento de análise adoptado seguiu o método da pipeta de Robinson, que consiste na quantificação das diferentes fracções que entram na terra fina, considerando a escala de Atterberg: areia grossa (2-0,2mm), areia fina (0,2-0,02mm), limo (0,02-0,002mm), argila (<0,002mm) (Silva, 1967). A partir dos valores obtidos para os quatro lotes granulométricos, determinou-se a classe de textura de acordo com o diagrama triangular, segundo a classificação internacional ISSS.

3.3.6 Capacidade de retenção de água

A capacidade máxima de retenção de água (pF 0), utilizada como medida da proporção de humidade que o solo pode reter quando, depois de saturado, se deixa a drenagem operar livremente, foi obtida por diferença de peso entre a amostra húmida e a seca a 105°C.

A capacidade de campo (pF 2) é um parâmetro que traduz a reserva hídrica com que o solo abastece a vegetação, sendo considerada o limite superior de água útil, e corresponde ao teor de humidade retido pelo solo quando, depois de ter cessado o movimento gravitacional, o movimento da água capilar decresce substancialmente. A sua determinação consistiu na aplicação da técnica de Richards, utilizando uma pressão de 0,1 bar (Anexo IV).

3.3.7 pH

A determinação do pH do solo foi efectuada em água e em solução de cloreto de potássio (KCl) através do método potenciométrico, utilizando um potenciómetro da marca Ortec.

3.4 Análise e tratamento estatístico dos dados

O tratamento estatístico dos dados foi realizado com recurso ao programa estatístico SPSS 10.0 para Windows. Numa primeira fase foi efectuada uma análise de médias e desvios-padrão. De modo a aferir o grau de associação entre variáveis foram ainda analisados os coeficientes de correlação de *Pearson*, que constituem uma medida de associação linear que se utiliza quando as variáveis se distribuem normalmente, sendo o respectivo coeficiente de variação compreendido entre +1,00 e -1,00 (Maroco, 2003). Para a identificação de grupos homogéneos de dados, foi aplicada a Classificação Hierárquica de *Clusters*, utilizada para medir a hierarquia de “proximidade” entre objectos (Maroco, 2003).

4. Caracterização da área de estudo

A bacia hidrográfica da Ribeira dos Covões (latitude 40°12'3'' a 40°10'41''N; longitude 8°26'17'' a 8°28'21'' W) ocupa uma área de cerca de 7 km², e localiza-se na margem esquerda do rio Mondego (Figura 8), que atravessa o Concelho de Coimbra, e integra-se na Área Funcional do Baixo Mondego (NUT III) (Figura 8). Este afluente do rio Mondego está identificado como o troço mais a montante da Vala do Sul, Marginal ou Real e classificado com o número de ordem 701 07 02 no Índice hidrográfico – classificação decimal dos cursos de água de Portugal (MHOP-DGRAH, 1981).

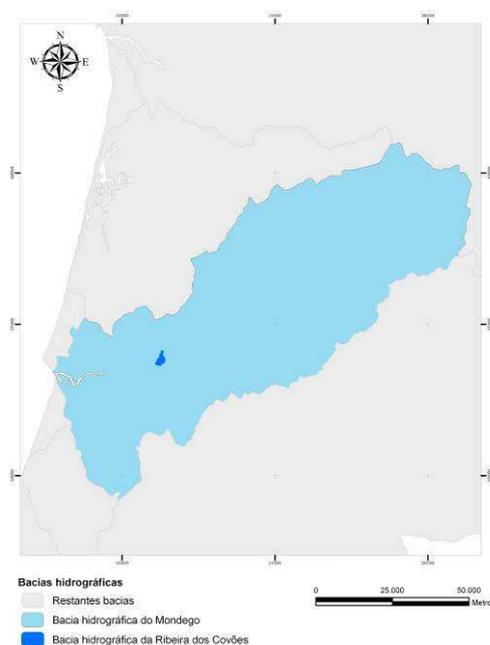


Figura 8 – Enquadramento da bacia da Ribeira dos Covões na bacia hidrográfica do Mondego.

4.1 Caracterização biofísica

4.1.1 Morfologia

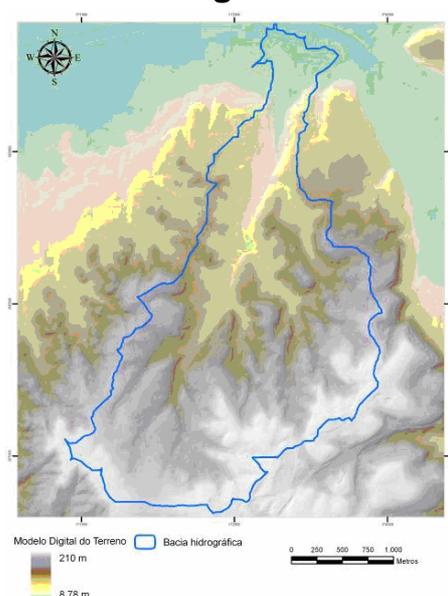


Figura 9 – Modelo digital do terreno da Bacia hidrográfica da Ribeira dos Covões.

A bacia em estudo apresenta uma forma alongada, com a maior dimensão a coincidir com o desenvolvimento principal do rio, de orientação no sentido S-N. A sua área caracteriza-se por uma morfologia relativamente simples e uniforme, exibindo uma altitude máxima de 210 m (Figura 9), com a maioria da área distribuída essencialmente entre os 66 e os 153 metros (cerca de 66%). As áreas de menor altitude (abaixo dos 40 metros) encontram-se a jusante da bacia hidrográfica, localizando-se em boa parte na ESAC. De referir

ainda a limitada representatividade de área acima dos 180m (2%), que determina um limitado *input* energético no escoamento superficial.

De acordo com o mapa de declives (Figura 10), o vale principal da bacia apresenta abertura assimétrica, com vertentes genericamente côncavas a ocidente e um modelado mais inciso na vertente direita.

De um modo geral, os declives podem classificar-se entre suave e moderado, uma vez que apenas 3% da área da bacia apresenta declive superior a 40%. Os declives compreendidos entre 25 e 40% abrangem uma área total da bacia de 17%, verificando-se que o intervalo de declives mais representativo compreende os valores entre 12 e 25% (abrange uma área de 40% da bacia). O mapa de declives revela ainda que 14 % da bacia apresenta declives compreendidos entre 7 e 12 % e, 7% da área com declives entre 4 e 7%. Os declives inferiores a 4%, encontram-se em boa parte na região Norte da bacia e correspondem a 17% da área.

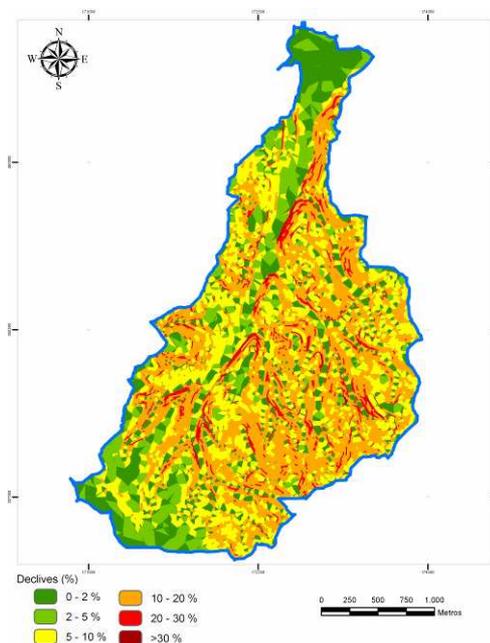


Figura 10 – Mapa de declives da bacia hidrográfica da Ribeira dos Covões.

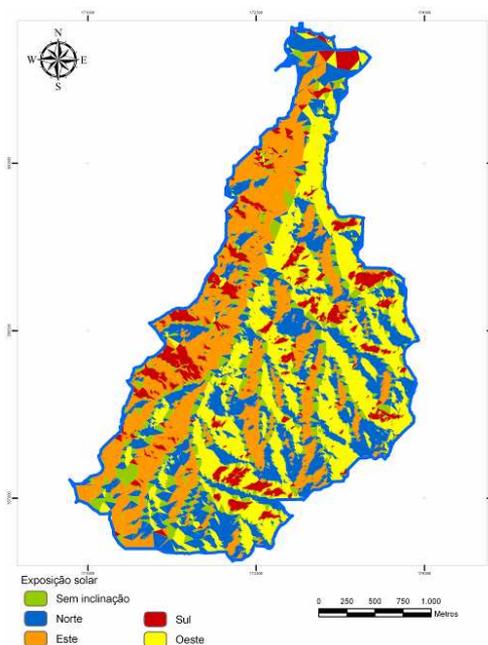


Figura 11 – Mapa da exposição solar da Ribeira dos Covões.

No que respeita à exposição das vertentes, não se verifica nenhum predomínio nítido. A exposição Este, Oeste e Norte representam 29%, 27% e 25% da bacia, respectivamente, enquanto 10% da área não apresenta exposição solar característica (declive inferior a 2%). Os restantes 9% da bacia apresentam exposição a sul (Figura 11).

De um modo geral, verifica-se que a exposição solar a Este e o Oeste estão relacionadas com a divisão longitudinal da bacia, promovida pela linha de água principal. As vertentes a Norte,

distribuídas um pouco por toda a bacia, são caracterizadas por um menor número de horas (diárias) com incidência solar, o que se reflecte na radiação incidente e reflectida e, nos processos de evaporação e evapotranspiração. A estas áreas está associada uma maior humidade relativa atmosférica e ao nível do solo, o que produz um acréscimo de susceptibilidade das vertentes á instabilidade (Tavares, 1999).

4.1.2 Geologia

Do ponto de vista geológico, a bacia hidrográfica da Ribeira dos Covões situa-se no confronto entre o Maciço Hespérico, constituído por terrenos precâmbrios e paleozóicos e, os depósitos da Orla Meso-Cenozóica Ocidental. O confronto destas duas unidades geomorfológicas faz-se ao longo do acidente estrutural meridiano que se integra na zona da fractura NNW-SSE (Tavares, 1999).

4.1.3 Clima

O clima na área de estudo, à semelhança do resto do País, é marcado pela influência mediterrânea, que se caracteriza por Verões quentes e secos, luminosidade forte, grande insolação e carência de chuvas; e Invernos moderados, em que a aragem marítima atlântica, ameniza a amplitude anual. De um modo geral, em Portugal, a temperatura média anual é cerca de +15°C, a precipitação média anual ronda os 980 mm e observam-se elevados valores de humidade relativa (80%).

Elementos climáticos

A descrição dos elementos climáticos incide apenas sobre os dados de temperatura (Tabela 3) e precipitação, na medida em que estes apresentam uma influência mais pronunciada no ciclo hidrológico, na região mediterrânea.

Tabela 3 – Valores de temperatura na estação meteorológica de Coimbra/Bencanta.

		1941 - 1970	1971 - 2000
Temperatura (°C)	Média	15,3	15,5
	Média máxima	21,3	21,2
	Média mínima	9,3	9,8
	Máxima	42,5	41,6
	Mínima	-6,5	-5,0
Precipitação (mm)	Total	904,5	900,4
	Máxima diária	84,0	64,5

De acordo com os dados apresentados na Tabela 3, podemos observar um ligeiro aumento da temperatura média na série normal de dados mais recente, bem como uma diminuição da precipitação total. Contudo, apesar da tendência crescente dos valores médios de temperatura, constata-se uma ligeira diminuição das temperaturas máximas e um aumento das mínimas, que parecem traduzir uma diminuição da amplitude térmica entre 191-2000, relativamente ao período entre 1941-1970. Com base nos dados de temperatura média e precipitação total é possível elaborar os diagramas ombrotérmicos de Gausen, apresentados na Figura 12.

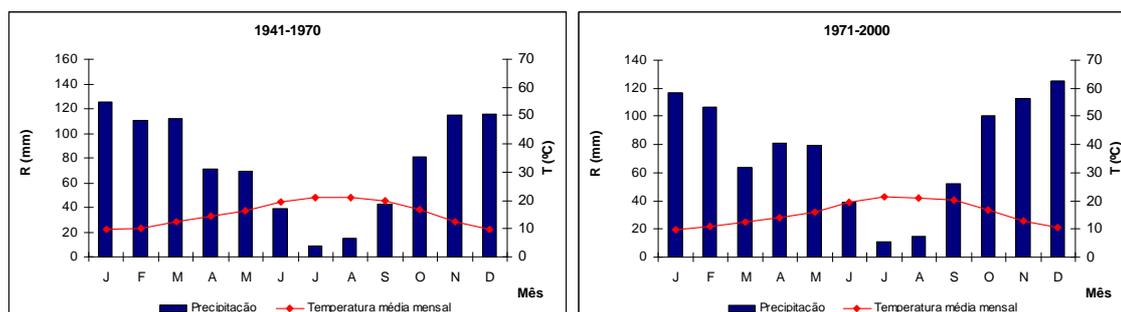


Figura 12 – Diagramas ombrotérmicos de Gausen na estação meteorológica de Coimbra/Bencanta referentes aos períodos 1941-1970 e 1971-2000.

Os diagramas ombrotérmicos de Gausen são característicos de um clima mediterrâneo húmido, uma vez que cerca de 60% da precipitação se concentra no período de Novembro a Março. Relativamente à época estival, observam-se variações entre as duas séries normais, que se traduzem pela ocorrência de 2 meses com precipitação inferior a duas vezes o valor da temperatura (Julho e Agosto), entre 1941 – 1970, e 3 meses para a normal climatológica de 1971 – 2000 (Junho, Julho e Agosto). No que respeita aos valores máximos de precipitação, representa-se na Figura 13 a variação mensal ao longo do ano.

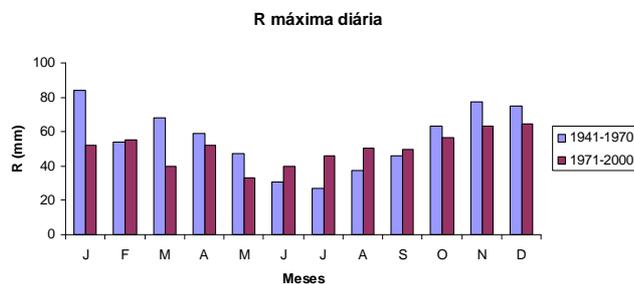


Figura 13 – Variação mensal da precipitação máxima diária das séries normais referentes aos períodos 1941-1970 e 1971-2000.

Da comparação entre os valores de precipitação máxima diária ao longo de 60 anos, podemos concluir que, de um modo geral, nos anos mais recentes (1971-2000), os

quantitativos foram maiores nos meses de Junho, Julho, Agosto (Verão) e Setembro. Ao longo do resto do ano, com excepção do mês de Fevereiro, os valores da precipitação máxima diária diminuíram no período 1971-2000.

A Figura 14 mostra a diferença da precipitação média mensal entre as duas séries nomais, tendo em consideração um valor médio de 75,4 mm para o período 1941-1970 e, de 75,0 mm para o período 1971-2000, ligeiramente mais baixo.

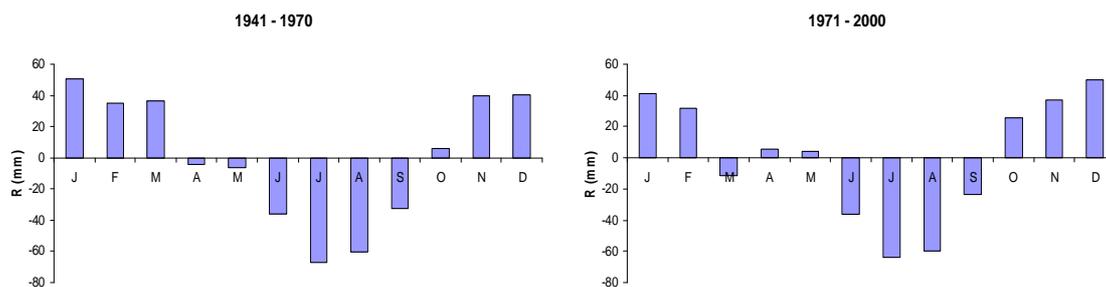


Figura 14 – Variação da precipitação média mensal.

Com base na Figura 14, salienta-se a grande diminuição da precipitação acumulada no mês de Março e o aumento da precipitação em Abril e Maio. Estes resultados vêm de encontro às observações registadas por Santos & Miranda (2006), que salientam a ocorrência nas últimas décadas de uma redução significativa da precipitação no mês de Março. Relativamente à variação no número de dias com precipitação superior a 1 mm e 10 mm, os resultados são apresentados na Figura 15.

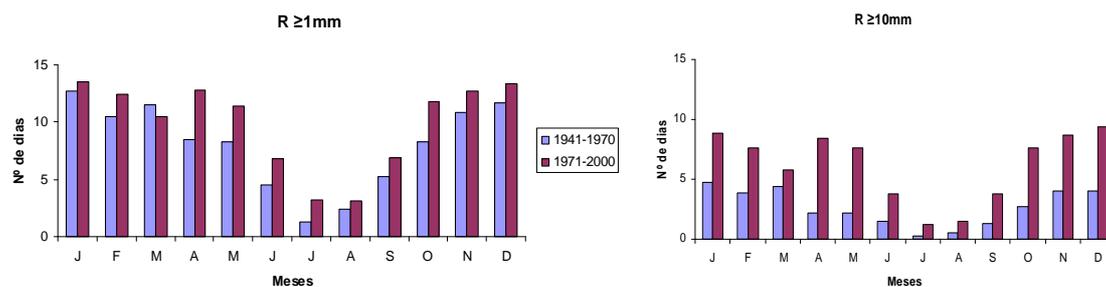


Figura 15 – Representação do número de dias mensais com precipitação igual ou superior a 1mm e 10mm.

De acordo com os dados apresentados na Figura 15e, apesar dos valores totais de precipitação terem diminuído entre as séries normais de dados analisados, verifica-se, de uma forma praticamente generalizada, um maior número de dias com maior precipitação nos anos entre 1971-2000. De facto, as previsões apontadas por modelos, prevêem em geral uma diminuição da precipitação, especialmente na Primavera e Outono, bem como

um aumento da ocorrência de dias com precipitação diária intensa (>10 mm/dia) (Santos & Miranda, 2006).

Classificação climática

Apesar das diversas utilizações das equações do balanço hidrológico, neste caso o objectivo foi a caracterização climática da área de estudo. Os resultados gráficos do balanço hidrológico são apresentados nas Figuras 16 e 17, contudo, os resultados em termos numéricos são apresentados no Anexo V.

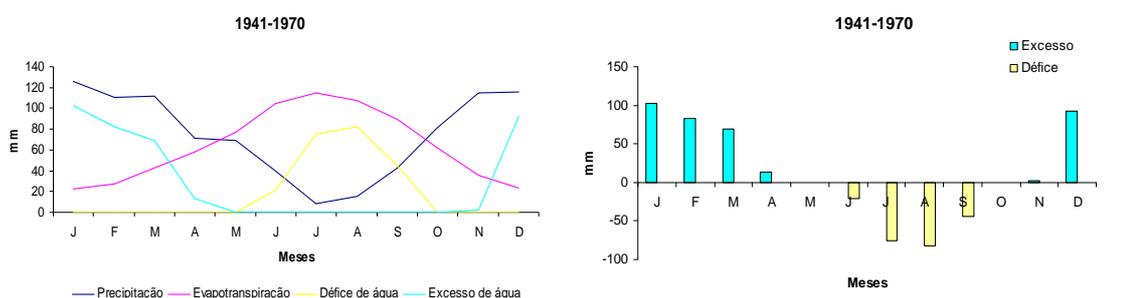


Figura 16 – Resultados do balanço hidrológico aplicado à normal climática de 1941-1970.

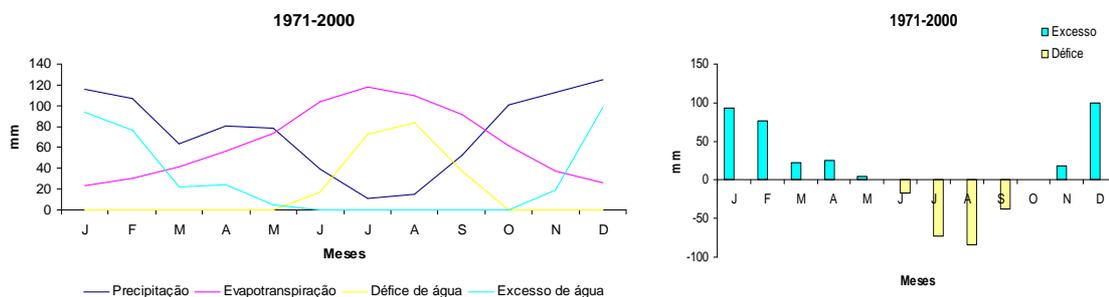


Figura 17 – Resultados do balanço hidrológico aplicado à normal climática de 1971-2000.

De acordo com os balanços hidrológicos, observa-se uma diminuição do período de tempo com déficit hídrico, que se inicia em Maio para a normal de 1941-1970 e, apenas em Junho no período 1971-2000. Em ambas as normais climatológicas, o déficit hídrico termina no mês de Setembro. Salienta-se assim, a diminuição do excesso de água verificado em Março nos dois períodos em estudo, bem como o aumento nos meses de Abril, Maio e Novembro.

Neste balanço hidrológico, admite-se que a capacidade utilizável do solo se encontra integralmente satisfeita no início do período seco, em Maio, na primeira série normal de

dados, e Junho para o período entre 1971-2000, e, que apartir de Outubro se entra no período húmido. Dado que no mês de Outubro o excesso de água, definido pela diferença entre a precipitação e a evapotranspiração potencial, não é suficiente para repor o armazenamento da água no solo ao nível da capacidade utilizável, o respectivo valor do superavit hídrico é nulo. Em Novembro, dado o preenchimento da capacidade utilizável, que ocorre nesse mês, verifica-se algum excesso de água. Apartir de Dezembro, o superavit hídrico passa a ser igual ao excesso resultante da diferença entre a precipitação e a evapotranspiração potencial verificado no próprio mês. Esta situação mantém-se até ao final do período húmido, no final de Abril e Maio, para as séries climatológicas de 1940-1970 e 1971-2000, respectivamente.

Os valores médios de evapotranspiração potencial sofreram um ligeiro aumento de 764,6 mm e 771,4 mm nos períodos entre 1941-1970 e 1971-2000, o que pode estar associado ao aumento do total anual de défice hídrico no solo, apesar do aumento dos totais anuais de precipitação, de 222,9 mm para 339,7 mm. O excesso anual de água no solo sofreu também um ligeiro aumento entre as duas normais climatológicas analisadas: de 362,9 mm para 339,7 mm. Na Figura 18 apresenta-se ainda a variação no regime hídrico do solo nos diferentes meses, para as normais climáticas em estudo.

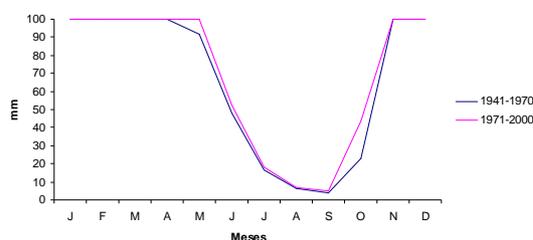


Figura 18 – Variação do armazenamento de água no solo nas séries climatológicas de 1941-1970 e 1971-2000.

Como reflexo das diferenças no ciclo hidrológico entre os dois períodos em estudo, observam-se algumas diferenças na variação do armazenamento de água no solo. Estas mudanças traduzem-se essencialmente num maior armazenamento de água no solo, em especial nos meses de Maio, uma vez que no período entre 1971-2000, este mês apresentou um excesso de água, por oposição ao verificado na série climática anterior. As diferenças são ainda notórias no mês de Outubro, onde os valores de armazenamento de água no solo aumentam de 23,1 mm para 43,5 mm, entre as duas séries climatológicas. Os valores mais

baixos de armazenamento de água no solo, registaram-se em Setembro, com diferenças mínimas entre os dois períodos em estudo (4,1 mm entre 1940-1971 e 4,7 em 1971-2000).

A partir da aplicação do balanço hidrológico sequencial aos valores médios mensais da precipitação e da evapotranspiração potencial (ETp), foram calculados os índices climáticos (índice de aridez, índice de humidade e índice hídrico), com base nos valores de défice (DH) e superavit hídrico (SH) anuais médios, que correspondem à soma dos respectivos valores mensais verificados ao longo do ano (Tabela 4).

Tabela 4 – Resultados dos índices climáticos para as séries climatológicas de 1941-1970 e 1971-2000.

Índice climático	1941-1970	1971-2000
Índice de aridez ($I_a=DH/ETp$)	29,2	27,3
Índice de humidade ($I_u=SH/ETp$)	47,5	44,0
Índice hídrico ($I_h=I_u-0,6 I_a$)	30,0	27,7

A partir dos resultados dos índices, apresentados na Tabela 4, conclui-se que o clima na bacia hidrográfica da ribeira dos Covões se pode classificar como pouco húmido (B1) e, com défice hídrico moderado no Verão.

4.1.4 Litologia

Relativamente à litologia, segundo Pato (2007) estão presentes 7 unidades líticas na bacia hidrográfica em estudo (Figura 19).

A unidade calco-dolomítica é uma unidade predominantemente carbonatada, caracterizada na sua base pelo carácter dolomítico mais homogéneo e, no topo, pelo aparecimento de termos carbonatados margosos, granulometricamente diferenciados, alternando com termos pelíticos. Apresenta formas de carsificação com grande desenvolvimento lateral e em profundidade, parcial ou totalmente preenchidas com diferentes materiais areno-siltosos avermelhados (Tavares, 1999).

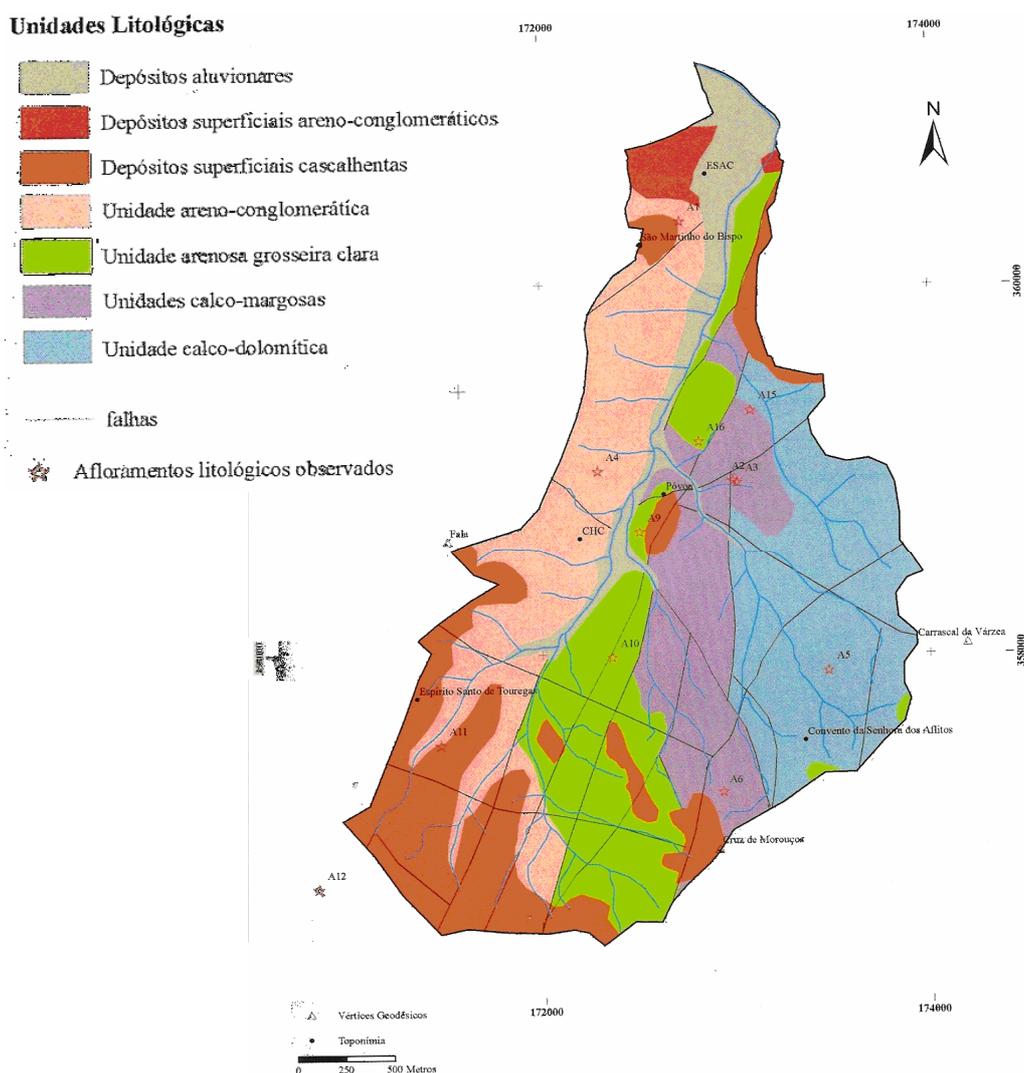


Figura 19 – Unidades litológicas e fracturação (adaptado de Pato, 2007).

A unidade calco-margosa é constituída por margas, margas calcárias e pelitos com tons esbranquiçados, amarelados, acastanhados e cinzentos, alternando com calcários margosos e bioclásticos, com tons esbranquiçados ou azulados. Por outro lado, a unidade arenosa grosseira clara é em geral constituída por arenitos e arenitos grosseiros mais ou menos argilosos, e ainda por corpos areno-conglomeráticos, finos a grosseiros e por corpos pelíticos. Apresenta tons amarelados, avermelhados ou cinzentos, e apresentam-se como friáveis ou pouco compactos, exibindo sulcos de erosão ravinante (Tavares, 1999; Pato, 2007).

A unidade areno-conglomerática apresenta litofácies conglomeráticas, arenosas grosseiras a finas e termos pelíticos. Nos depósitos superficiais cascalhentas, predominam os seixos e

calhaus essencialmente sub-arredondados, com predomínio de areia grossa na parte inferior (Pato, 2007).

Os depósitos aluvionares são uma unidade lítica resultante da acumulação de materiais associados à dinâmica fluvial, com uma expressão cartográfica coincidente com o actual leito do curso de água principal da ribeira dos Covões e das zonas de confluência com o rio Mondego, a jusante. Os referidos depósitos são genericamente constituídos por corpos conglomeráticos de seixo e calhaus, corpos arenosos grosseiros a médios, corpos arenosos finos e siltosos micáceos, corpos pelíticos e corpos pelíticos orgânicos (Tavares, 1999; Pato, 2007).

A área em análise enquadra-se numa região em que os acidentes estruturais determinam rejogos dos diferentes corpos líticos, pelo que a tectónica condiciona toda a morfologia e traçado da rede hidrográfica (Pato, 2007).

4.1.5 Solos

Na bacia hidrográfica da ribeira dos Covões, salientam-se como unidades taxonómicas mais relevantes os Fluvissoles êutricos, os Cambissolos e os Podzóis.

Os Fluvissoles êutricos, que ocorrem ao longo dos cursos de água, são solos não evoluídos ou incipientes, que derivam de depósitos aluvionares recentes. Estes solos são normalmente profundos, com textura geralmente muito heterogénea, com teor médio de matéria orgânica nos níveis superiores, e pouco frequentemente com propriedades hidromórficas abaixo de 1m de profundidade. São em regra bem drenados internamente, podendo no entanto, no Inverno, estar sujeitos a inundações, que em geral é pouco prolongada (Tavares, 1999; Pato, 2007).

Os Cambissolos são no geral caracterizados por apresentarem como horizonte diagnóstico um horizonte câmbico, formado sub-superficialmente por alteração dos materiais *in situ* (Costa, 1999). Na área em estudo, estão associados a conglomerados, margas e calcários geralmente dolomíticos, do Jurássico-Triásico, e calcários, calcários dolomíticos, calcários margosos e margas, do Jurássico (Pato, 2007).

Os Podzóis, encontram-se a Sudeste e a Nor-nordeste da bacia, e são essencialmente Podzóis órticos, associados a Cambissolos êutricos, que se caracterizam por apresentarem um horizonte com apreciável acumulação de materiais amorfos de elevada capacidade de troca. Estes solos apresentam uma fraca capacidade de retenção de água e elevada permeabilidade (Pato, 2007).

Relativamente à capacidade de uso do solo, na área em estudo predominam essencialmente as classes de capacidade de uso D e C (Figura 20), com uma representatividade de 55% e 25%, respectivamente (Pato, 2007).

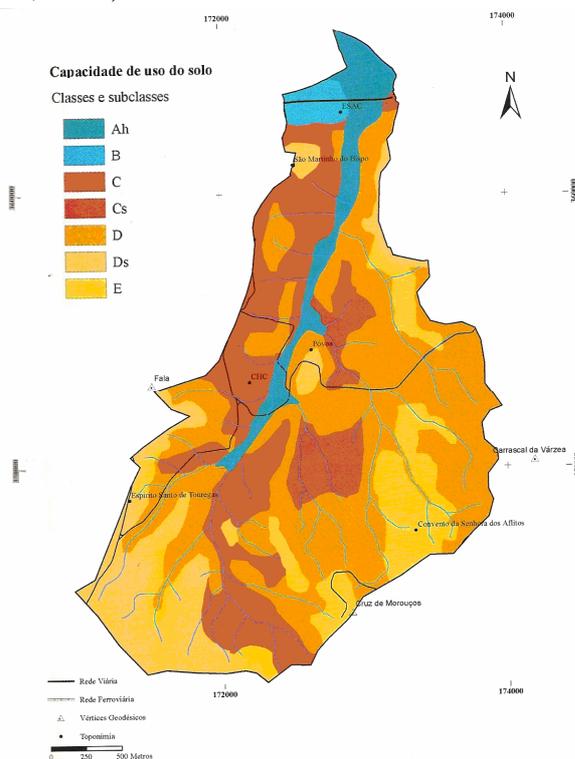


Figura 20 – Carta da capacidade de uso do solo da bacia hidrográfica da ribeira dos Covões (adaptado de Pato, 2007).

As áreas correspondentes à classe C, ocorrem a montante e a oeste da bacia hidrográfica, apresentam limitações acentuadas de utilização, riscos de erosão máximo elevados e são susceptíveis de utilização agrícola pouco intensiva. Apresentam um potencial de escoamento directo considerável e baixas intensidades de infiltração, quando completamente humedecidos, e possuem uma permeabilidade baixa (Atlas do Ambiente, 1982).

Também a montante da bacia hidrográfica, predominam os solos de classe D, que apresentam severas limitações de utilização, riscos de erosão elevados a muito elevados. Estes solos não são susceptíveis de uso agrícola, salvo em casos muito especiais, e consideram poucas ou moderadas limitações para pastagens, exploração de matos e exploração florestal. Refere-se ainda que estes solos apresentam um potencial de escoamento directo elevado e intensidade de infiltração muito baixa, quando completamente humedecidos, possuindo uma permeabilidade muito baixa.

Ao longo da ribeira dos Covões encontram-se solos de classe A, os quais apresentam excesso de água (Ah), pelo facto de estarem sujeitos a inundações, geralmente pouco prolongadas, com especial incidência no Inverno. São solos que não apresentam riscos de erosão ou, no caso de apresentarem, são muito baixos, têm associado às suas características um baixo potencial de escoamento directo e elevadas intensidade de infiltração. São solos susceptíveis de utilização agrícola intensiva, estando incluídos na Reserva Agrícola Nacional e Reserva Ecológica Nacional, correspondendo a áreas de infiltração máxima e que contribuem para a alimentação de lençóis freáticos (Pato, 2007).

4.1.6 Recursos hídricos

A ribeira dos Covões nasce na Cruz dos Mouroços, a uma altitude de cerca de 170 m, e percorre uma distância aproximada de 4 km, até ao rio Mondego, onde desagua a uma altitude de cerca de 10 m. Desenvolve-se, de forma predominante, com orientação S-N, e apresenta vários afluentes.

A bacia hidrográfica da ribeira dos Covões constitui uma das bacias de drenagem da margem esquerda do rio Mondego, imediatamente a jusante de Coimbra. Encontra-se abrangida, em parte, pelos Campo do Mondego que estão marcados desde tempos históricos, por dinâmicas fluviais a que se associam processos de cheias e inundações, por transbordo de caudais e dificuldades de drenagem causadas pela ocupação e transformação agrícola dos campos, ou pelo baixo gradiente hidráulico (Pato, 2007).

No que respeita à caracterização geométrica, a bacia em estudo apresenta um comprimento de 5,0 km e um perímetro de 15,9 km, que se traduz numa área de drenagem de 7,04 km². Esta bacia revela uma geometria alongada (coeficiente de forma de 0,28) que favorece os

processos de escoamento, traduzindo-se numa maior tendência para a ocorrência de inundações, e revela uma geometria compacta (coeficiente de compacidade igual a 1,67), sujeita à ocorrência de picos de cheia.

Relativamente ao sistema de escoamento, a bacia é bem drenada (densidade de drenagem de $4,2 \text{ km km}^{-2}$), com grande escoamento superficial, o que pode determinar uma maior susceptibilidade para a ocorrência de cheias.

A bacia hidrográfica apresenta uma rede de drenagem do tipo dentrítica, associada a um curso de água do tipo perene, com um grau de 4ª ordem segundo a hierarquização de Strahler. De acordo com a classificação dos cursos de água proposta pelo referido autor, a bacia hidrográfica apresenta ainda uma série de cursos de água com um regime de escoamento do tipo efémero, que existem apenas durante ou imediatamente após os períodos de precipitação e só transportam escoamento superficial (cursos de água de 1ª ordem). Estão ainda presentes cursos de água com uma constância intermitente (2ª e 3ª ordem), que em geral escoam durante as estações húmidas e secam nas de estiagem (Tabela 5).

Tabela 5 – Características do sistema de escoamento da bacia hidrográfica da ribeira do Covões.

Ordem dos cursos de água, segundo Strahler (Nº)	Coefficiente de bifurcação (Rb)	Relação entre o comprimento médio dos canais de cada ordem (RLm)
1ª ordem: 46	-	-
2ª ordem: 11	3,0	1,78
3ª ordem: 3	3,7	1,79
4ª ordem: 1	4,2	1,81

A relação de bifurcação (razão entre o nº de canais de uma ordem e o nº de canais de ordem imediatamente superior) apresenta um valor médio de 3,6, que sendo um valor moderado, sugere que a rede de drenagem é pouco evoluida. Salienta-se ainda que a relação de bifurcação não apresenta uma progressão geométrica, o que traduz a heterogeneidade lítica existente, e que permite afirmar que a bacia em estudo evidência uma dinâmica erosiva (Pato, 2007).

Tendo em consideração o comprimento dos canais existentes na bacia (29,8 km) e a respectiva área de drenagem, estima-se que a densidade de drenagem apresenta um valor de $4,23 \text{ km km}^{-2}$, o que sugere uma bacia bem drenada. Este parâmetro constitui também

um índice da tendência para a ocorrência de cheias numa bacia. Em igualdade de factores, as bacias com maior densidade de drenagem tenderão a estar menos sujeitas a cheias do que as bacias com menor densidade de drenagem (Lencastre & Franco, 2006).

O declive médio da bacia é 14%, o que traduz ainda um elevado potencial energético, associado a um escoamento superficial rápido (Figura 21).

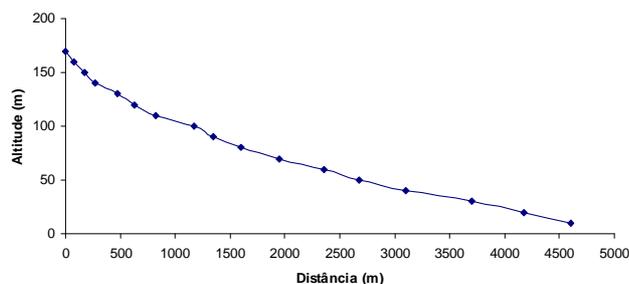


Figura 21 – Perfil longitudinal da ribeira dos Covões.

No que respeita aos recursos hídricos subterrâneas, apenas podemos dizer que a bacia da Ribeira dos Covões se localiza numa zona correspondente à bacia sedimentar do Mondego, com importantes recursos em águas subterrâneas. Nesta bacia sedimentar os aquíferos ocorrem em rochas detríticas (areias, arenitos, conglomerados e cascalheiras) ou rochas carbonatadas, frequentemente fracturadas e carsificadas, onde se assinalam numerosas exurgências com caudais muito elevados durante a época húmida e significativamente mais baixos, ou mesmo nulos, durante a época seca (Cristo, 1988).

4.1.7 Vegetação

A vegetação da área enquadrante insere-se na Região Mediterrânea, onde as espécies características do clima temperado mediterrâneo são responsáveis por uma originalidade florística e grande biodiversidade. Nesta região são característicos os bosques e matagais de árvores e arbustos de folhas planas e em muitos casos aciculares, de tamanho reduzido, persistentes e do tipo coreácio (esclerófilas) – *durisilvae* – destacando-se os diferentes carvalhos (*Quercus spp.*), a aroeira (*Piscacia lentiscus*), o folhado (*Viburnum tinus*), o zambujeiro (*olea europeia var. sylvestris*), o sanguinho-das-sebes (*Rhamnus alaternus*) e o loureiro (*Laurus nobilis*) (Costa *et al.*, 1998).

Contudo, a intervenção humana alterou, à semelhança do que aconteceu no resto do país, a paisagem vegetal, pelo que se podem encontrar áreas com povoamentos de resinosas, como o pinheiro manso (*Pinus pinea*) e pinheiro-bravo (*Pinus pinaster*), e de eucalipto, ou a sua mistura com outras espécies.

4.2 Enquadramento sócio - económico

4.2.1 Análise demográfica

Das trinta e uma freguesias pertencentes ao concelho de Coimbra, apenas parte de três freguesias pertencem à bacia da ribeira dos Covões: São Martinho do Bispo (12% da área total), Santa Clara (35%) e Antanhol (13 %).

A análise demográfica, baseada nos dados do INE, procura estudar a evolução da população entre o final do século passado (1890) e o momento do último censo disponível (2001), nas freguesias abrangidas pela área de estudo (Tabela 6).

Tabela 6 – Número de habitantes residente no concelho de Coimbra e nas freguesias pertencentes à área de estudo, entre 1890 e 2001.

Concelho/Freguesia	1890	1940	1970	1981	1991	2001
Coimbra (concelho)	51226	85702	110060	138930	138961	148443
São Martinho	3973	6225	9195	12318	12454	14246
Santa Clara	1663	4135	9005	9826	8708	9637
Antanhol	634	1021	1420	1831	2117	2447

No período entre 1890 e 2001 registou-se uma variação significativa do número de habitantes residentes, associado a um crescimento populacional acentuado que se traduz por um aumento de 230% no concelho de Coimbra e, de 420% nas três freguesias que abrangem a bacia hidrográfica da Ribeira dos Covões. Contudo, o crescimento total da população tem vindo a diminuir ao longo dos anos, tendo mesmo registado uma estagnação entre 1981-1991 no concelho de Coimbra e uma diminuição de 3% no número total de habitantes das freguesias de Antanhol, Santa Clara e São Martinho do Bispo. De salientar que nas três freguesias consideradas, a partir de 1970, as variações anuais da população foram sempre mais baixas na freguesia de Santa Clara (nas imediações da cidade de Coimbra), e mais elevadas em São Martinho do Bispo, no período entre 1970-1981, e Antanhol (freguesia mais afastada do centro da cidade), a partir de 1981. Esta breve

abordagem demográfica efectuada nas freguesias em estudo, mostra a deslocalização das pessoas do centro da cidade para as áreas envolventes, provocando assim, a progressiva urbanização do espaço envolvente à cidade.

A expansão urbana traduz-se na classificação das referidas freguesias de Santa Clara e São Martinho do Bispo como Áreas Predominantemente Urbanas (densidade populacional superior a 500 hab. km⁻²). Antanhol é classificado como freguesia semi-urbana (densidade populacional entre 100 e 500 hab. km⁻²) (Pato, 2007).

De salientar que a distribuição actual da população revela contrastes entre as freguesias bem como entre a parte norte e sul da bacia. Na parte norte devido à vasta área ocupada pela ESAC e na parte sul devido à mancha florestal existente.

Visto que as freguesias pertencentes à área de estudo se encontram dentro do limite da cidade de Coimbra e constituem zonas privilegiadas de expansão habitacional, o edificado tem vindo a aumentar grandemente. De acordo com dados do INE, entre 1991 e 2001 o número de edifícios incluídos nas freguesias aumentou 23,4%, 23,6% e 18,5% em Santa Clara, São Martinho do Bispo e Antanhol, respectivamente. O crescimento do edificado, foi ainda acompanhado pelo desenvolvimento das vias de comunicação existentes, especialmente a jusante da bacia hidrográfica. Todas estas modificações sociais na bacia têm vindo a ser acompanhadas por alterações nas actividades económicas (Tabela 7).

Tabela 7 – Variação da representatividade dos diversos sectores de actividade económica, no concelho de Coimbra e nas freguesias pertencentes à área de estudo, entre 1991 e 2001 (Fonte: INE).

Concelho/ Freguesias	Agricultura, silvicultura e pesca (%)		Indústria, construção, energia e água (%)		Serviços (%)	
	1991	2001	1991	2001	1991	2001
Coimbra (concelho)	2,4	1,0	26,3	21,4	71,3	77,6
Antanhol	1,9	0,4	45,2	30,6	52,9	69,0
Santa Clara	0,5	0,2	22,2	17,0	77,3	82,8
São Martinho do Bispo	0,8	0,7	29,2	22,5	70,0	76,8

De acordo com os censos de 1991 e de 2001, observa-se que o sector da agricultura, silvicultura e pesca tem uma representação muito reduzida em termos de empregabilidade da população. No entanto, os dados revelam ainda um decréscimo do número de habitantes a trabalhar no sector primário, no concelho de Coimbra e na freguesia de Antanhol, acompanhado de um aumento da representatividade do sector dos serviços.

De um modo geral, podemos referir que a evolução demográfica associada às alterações sócio-económicas, nomeadamente no que respeita ao abandono da agricultura, têm marcado de forma significativa a transformação do espaço.

4.2.2 Uso do solo

Evolução nas últimas décadas

De acordo com Pato (2007), o uso do solo no período entre 1958 e 2002 sofreu profundas alterações (Figura 22).

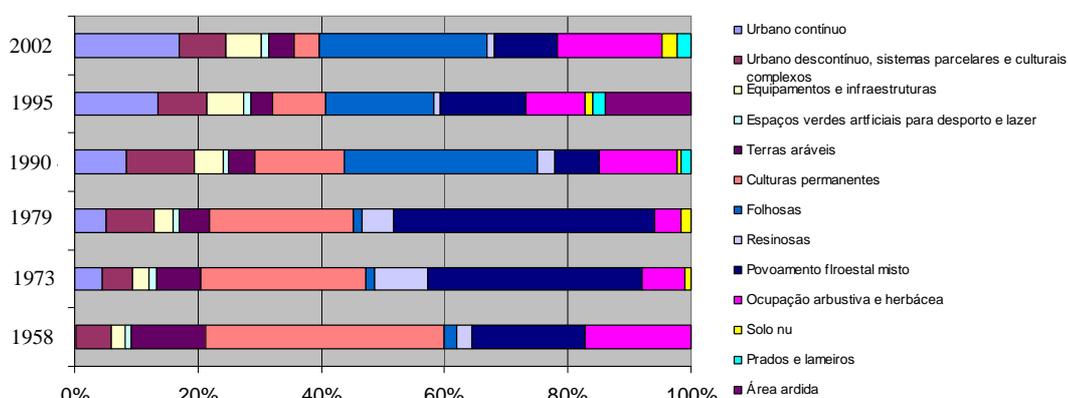


Figura 22 - Evolução das subclasses de ocupação do solo, em percentagem, entre os anos de 1958 e 2002.

Para um período de análise de 40 anos, registou-se um sucessivo aumento do tecido urbano contínuo, e, pequenas variações nas áreas de tecido urbano descontínuo e sistemas parcelares e culturais complexos. Relativamente à área ocupada por equipamentos e infraestruturas, verifica-se um ligeiro aumento. Os espaços verdes artificiais para desporto e lazer apresentam uma certa estagnação da representatividade ao longo dos anos. No que respeita à suclasse de ocupação do solo designada por vegetação arbustiva e herbácea, apesar das variações ao longo dos anos, apresenta em 2002 a mesma representatividade, em termos de área, que no ano de 1958.

É evidente a grande diminuição da área com culturas permanentes, que deu lugar ao crescimento das áreas com folhosas, a partir do ano 1990. Contudo, estas áreas foram afectadas por um incêndio em 1994 (afectou 14% da área da bacia – 98 hectares), o que se

tornou visível no uso do solo em 1995. Em termos de ocupação florestal, salienta-se ainda a diminuição da área ocupada por resinosas e, o aumento do povoamento florestal misto até 1979, que depois foi alvo de uma rápida diminuição, observável em 1990.

Assinala-se ainda a pouca alteração da ocupação com terras aráveis, a partir de 1990, facto que pode estar associado à aplicação do regime de reserva agrícola nacional. Neste ano, verifica-se também o aparecimento de uma nova subclasse de uso do solo, os prados e lameiros, com uma ocupação de cerca de 2%, pouco variável ao longo dos anos. O solo nu aparece em 1973, ano a partir do qual se manteve com algumas variações de área, e com um tendência ligeiramente crescente relativamente ao ano 2002.

De um modo geral, pode dizer-se que a bacia hidrográfica passou de um predominante uso agrícola (51%), no ano de 1958, para uma ocupação com florestas e meios semi-naturais (56%) em 2002, em que a ocupação agrícola apresenta uma diminuição de 40%.

Tendo em consideração todas estas variações na ocupação do solo, Pato (2007) considera a ocorrência de 3 períodos distintos na bacia hidrográfica da ribeira dos Covões:

- Domínio rural, entre os anos de 1958 e 1973;
- Urbanização descontínua, entre os anos de 1979 e 1990;
- Consolidação urbana, entre os anos de 1990 e 2002.

A partir do ano de 1973 e até 1990, verificaram-se alterações de uso e ocupação que transformaram o domínio rural num espaço com ocupação urbana descontínua. Esta ocupação urbana muito dispersa traduz o aparecimento da peri-urbanização, a qual não significa um retorno ao campo mas um novo processo de urbanização, em que os novos residentes não apresentam relações de proximidade com o espaço que ocupam. Entre os anos de 1990 e 2002, ocorreu a consolidação urbana, transformando o tecido urbano num espaço contínuo, desligado da economia natural, onde o tipo de edifícios construído ignora o contexto sócio-cultural em que se inserem (Carvalho, 2003).

Os três períodos destacados nesta análise estão também associados à actividade económica da população. No ano de 1950 o sector primário e terciário constituíam a fonte de rendimento de 29% da população, enquanto em 2001 representavam apenas 1% e 78%, respectivamente (Pato, 2007).

Uso do solo actual

Apesar de Pato (2007) apresentar dados de uso do solo relativos ao ano de 2002, as publicações oficiais apenas expõem os dados referentes ao ano 2000, apresentados pelo projecto *Corine Land Cover*. Deste modo, a avaliação do uso do solo actual foi realizada com base em dados de 2000 (Figura 23), podendo observar-se na Tabela 8 a representatividade de cada uma das subclasses de uso do solo, que não coincidem com as subclasses consideradas por Pato (2007).

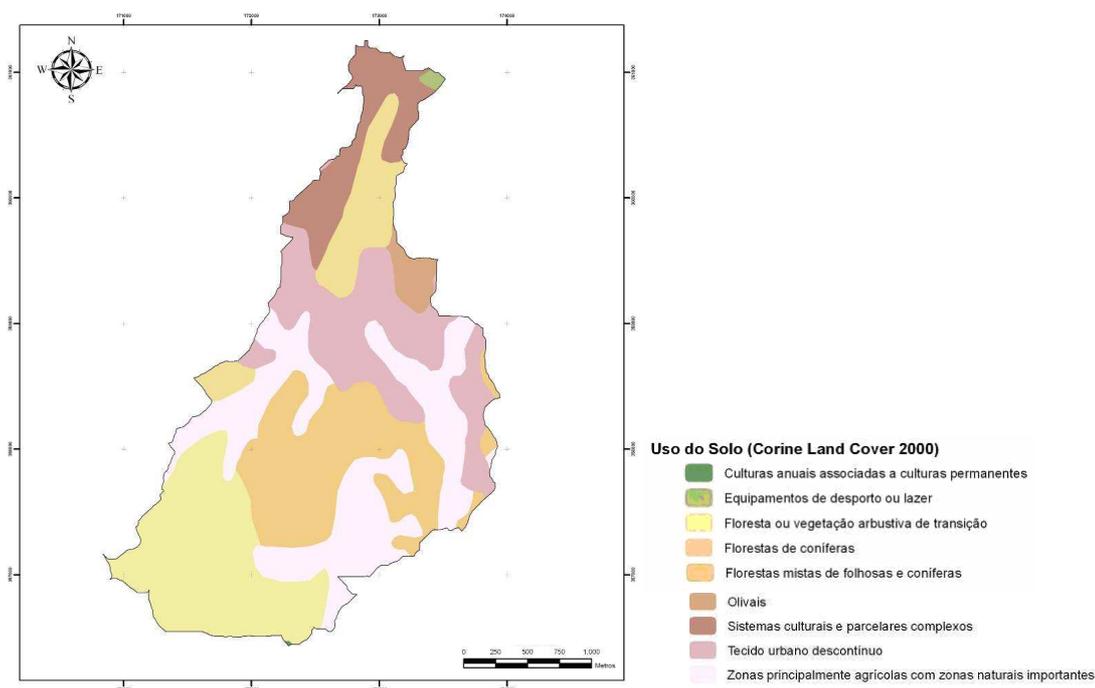


Figura 23 – Uso do solo na bacia hidrográfica da ribeira dos Covões, referente ao ano 2000.

Tabela 8 – Representatividade das subclasses de uso do solo referentes ao ano 2000.

Subclasse de uso do solo	Área	
	(%)	(ha)
Culturas anuais associadas a culturas permanentes	0,02	0,1
Equipamentos de desporto e lazer	0,28	2,0
Floresta ou vegetação arbustiva de transição	20,74	146,1
Florestas de coníferas	7,77	54,8
Florestas mistas de folhosas e coníferas	19,71	138,9
Olivais	1,98	13,9
Sistemas culturais e parcelares complexos	8,13	57,3
Tecido urbano descontínuo	17,51	123,3
Zonas principalmente agrícolas com zonas naturais importantes	23,86	168,1

A partir da Figura 23 e Tabela 8 é possível observar que as zonas principalmente agrícolas são as mais representativas no ano 2000 (24%), seguida das florestas ou vegetação arbustiva de transição (21%) e florestas mistas de folhosas e coníferas (20%). O tecido urbano descontínuo representava cerca de 18% da bacia e, os sistemas culturais e parcelares complexos abrangiam 8% da área total. Contudo, em 2002, Pato (2007) apresenta valores de 17% para a ocupação com tecido urbano contínuo e 7,5% para o tecido urbano descontínuo e sistemas parcelares e culturais complexos. Apesar da classificação do uso do solo, de acordo com o projecto *Corine Land Cover 2000*, não considerar a subclasse de tecido urbano contínuo, o total das áreas de tecido urbano e sistemas parcelares e culturais complexos em 2000 e 2002 manteve-se praticamente constante. No entanto, em 2002, 5,8 % da ocupação do solo foi atribuída a equipamentos e infraestruturas.

Considerando as subclasses floresta ou vegetação arbustiva de transição, florestas de coníferas e, florestas mistas de folhosas e coníferas o total de área ocupada por floresta, em 2000, abrange 48,2% da bacia. Contudo, o total de área ocupada em 2002 por folhosas, resinosas, povoamento florestal misto e ocupação arbustiva e herbácea, segundo Pato (2007), abrange um total de 55,6% da área de estudo.

Em 2000, as culturas anuais associadas a culturas permanentes e as zonas principalmente agrícolas com zonas naturais importantes, ocupavam 23,9%. No entanto, segundo Pato (2007), em 2002, a área ocupada por terras aráveis, culturas permanentes, solo nu, prados e lameiros, representava apenas cerca de 13,0% da bacia da ribeira dos Covões. Contudo, em 2002, 1,2% da área foi classificada como espaços verdes artificiais para desporto e lazer.

As diferentes classificações utilizadas, considerando o trabalho de Pato (2007), tornam difícil a comparação dos usos do solo entre os anos 2000 e 2002. Apesar de tudo, é notável a expansão do tecido urbano a partir do ano 2000, prevendo-se ainda o seu alargamento futuro tendo em consideração os projectos urbanísticos em decurso.

5. Resultados e Discussão

5.1 – Hidrologia dos solos

O presente subcapítulo tem por objectivo caracterizar o solo e perceber a relação entre os vários parâmetros e a capacidade de infiltração de água no solo. Pretende-se ainda estudar as variações no teor de humidade, hidrofobia e taxa de infiltração dentro da bacia e ao longo do tempo.

5.1.1 – Caracterização dos solos

5.1.1.1 – Características físicas

Textura

É comumente aceite que os solos de texturas finas (argilosos, argilo-arenosos e silto-argilosos) apresentam grande aptidão para a retenção de água, baixa percolação, infiltração e arejamento, bem como elevada capacidade de retenção de nutrientes e de matéria orgânica, ao contrário do evidenciado pelos solos de texturas grosseiras (arenosos, franco-arenosos e areno-francos) que, no geral, exibem uma baixa retenção de água, uma boa drenagem e arejamento, baixa capacidade de retenção de nutrientes e rápida mineralização da matéria orgânica (Nunes, 2007).

Tendo em consideração a importância da textura do solo nos processos de infiltração, referida por diversos autores (Cerdà & Bolinches, 1995; Ferreira, 1996; Costa, 1999; Ritsema, 1999; Casanellas & Reguerín, 2005; Nunes, 2007; Pato, 2007), foi efectuada a análise granulométrica nos 13 locais monitorizados dentro da bacia da ribeira dos Covões, cujos resultados se apresentam na Figura 24.

Processos hidrológicos na bacia da Ribeira dos Covões

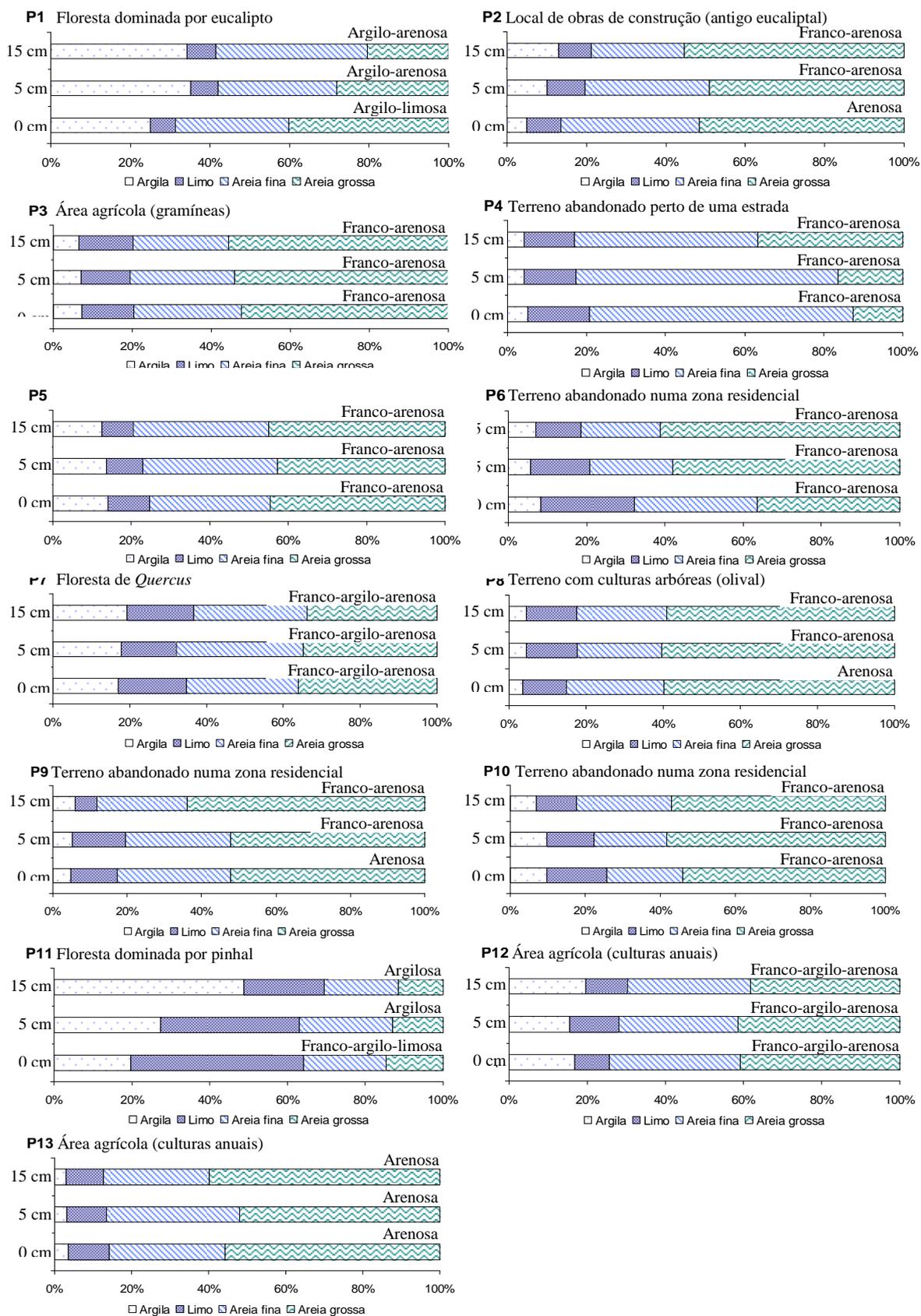


Figura 24 - Valores das fracções granulométricas (argila, limo, areia fina e areia grossa) e respectiva classificação textural, a diferentes profundidades do solo (0-2cm, 5-7 cm e 15-17cm), nos locais de monitorização.

De um modo geral, observam-se algumas variações em termos de textura dentro da bacia em estudo e, em alguns casos, variações no perfil. Contudo, predomina a ocorrência de solo franco com textura moderadamente grossa - pontos P2, P3, P4, P5, P6, P8, P9 e P10, segundo a classificação proposta por Casanellas & Reguerín, 2005. Estes pontos apresentam um perfil de solo homogéneo no que respeita à análise granulométrica, com excepção de P2, P8 e P9 que expõem solos arenosos de textura grosseira na camada superficial (0-2 cm). Este tipo de solo com textura grosseira é também encontrado no ponto P13, em todo o perfil analisado (0-17 cm). Os pontos P7 e P12 exibem também solos francos mas de textura moderadamente fina, que acompanham todo o perfil analisado. No que respeita a P11, caracteriza-se por um solo franco de textura moderadamente fina na camada superficial (0-2 cm), revelando depois um solo argiloso de textura fina nas camadas subsuperficiais (5-17 cm). Já o ponto P1, manifesta um solo argiloso de textura fina em toda a sua profundidade, apesar da classe textural variar entre a camada superficial e subsuperficial (argilo-limosa dos 0-2 cm e argilo-arenosa dos 5-17 cm).

Segundo Costa (1999), a textura depende de vários factores, nomeadamente a rocha-mãe, da topografia e do clima. No entanto, os resultados obtidos não revelam uma nítida relação entre as características granulométricas dos solos e o material originário. Por exemplo, os locais P1, P2 e P10 localizam-se numa unidade lítica caracterizada por depósitos superficiais, e apresentam diferentes classes de textura. Refira-se, no entanto, que apesar da proximidade geográfica entre P1 e P2, os diferentes resultados da análise granulométrica estão associados ao facto de em P2, boa parte da camada superficial do solo ter sido removida mecanicamente devido às obras que este local está a ser alvo.

Segundo Pato (2007), as unidades carbonatadas (P6, P7, P8, P9, P11 e P12) apresentam uma preponderância das granulometrias limo e argila, o que apenas se verifica claramente em P11 (percentagem de limo e argila superior a 60%). Contudo, os maiores teores de argila e limo foram encontrados em solos com uso florestal (P1, P7 e P11), pelo que o tipo de uso pode ter influência na granulometria, tal como referido por Nunes (2007).

Do ponto de vista da capacidade de adsorção de água, existe uma diferenciação entre as propriedades das partículas inferiores a 2 μ m e as propriedades das partículas com diâmetro superior, directamente relacionada com a superfície disponível por unidade de massa. Os solos com textura fina apresentam uma maior percentagem de volume ocupado por poros

que os solos com textura mais grosseira, diminuindo ao mesmo tempo a dimensão média dos poros, o que aumenta a capacidade de retenção de água pelo solo. Assim, quanto mais grosseira a granulometria dos horizontes superficiais do solo, maior a capacidade de infiltração (Ferreira, 1996). Deste modo, P2, P8, P9 e P13, são os locais mais susceptíveis a maior capacidade de infiltração de água e, P1, P11, P7 e P12, respectivamente os que apresentam menor capacidade.

Segundo Casanellas & Reguerín (2005), solos arenosos (P2, P8, P9 e P13) apresentam um baixo potencial para geração de escorrência e, estão associados a elevada condutividade hidráulica. Os solos argilosos (P1), pelo contrário, estão associados a valores de escorrência médios a altos e baixa condutividade hidráulica.

Densidade aparente

A densidade é das propriedades do solo que sofre maiores alterações com a intervenção humana, pelo que tem uma particular importância para os processos da água no solo (Ferreira, 1996; Nunes, 2007). Os resultados da densidade aparente dos solos em estudo podem observar-se na Figura 25.

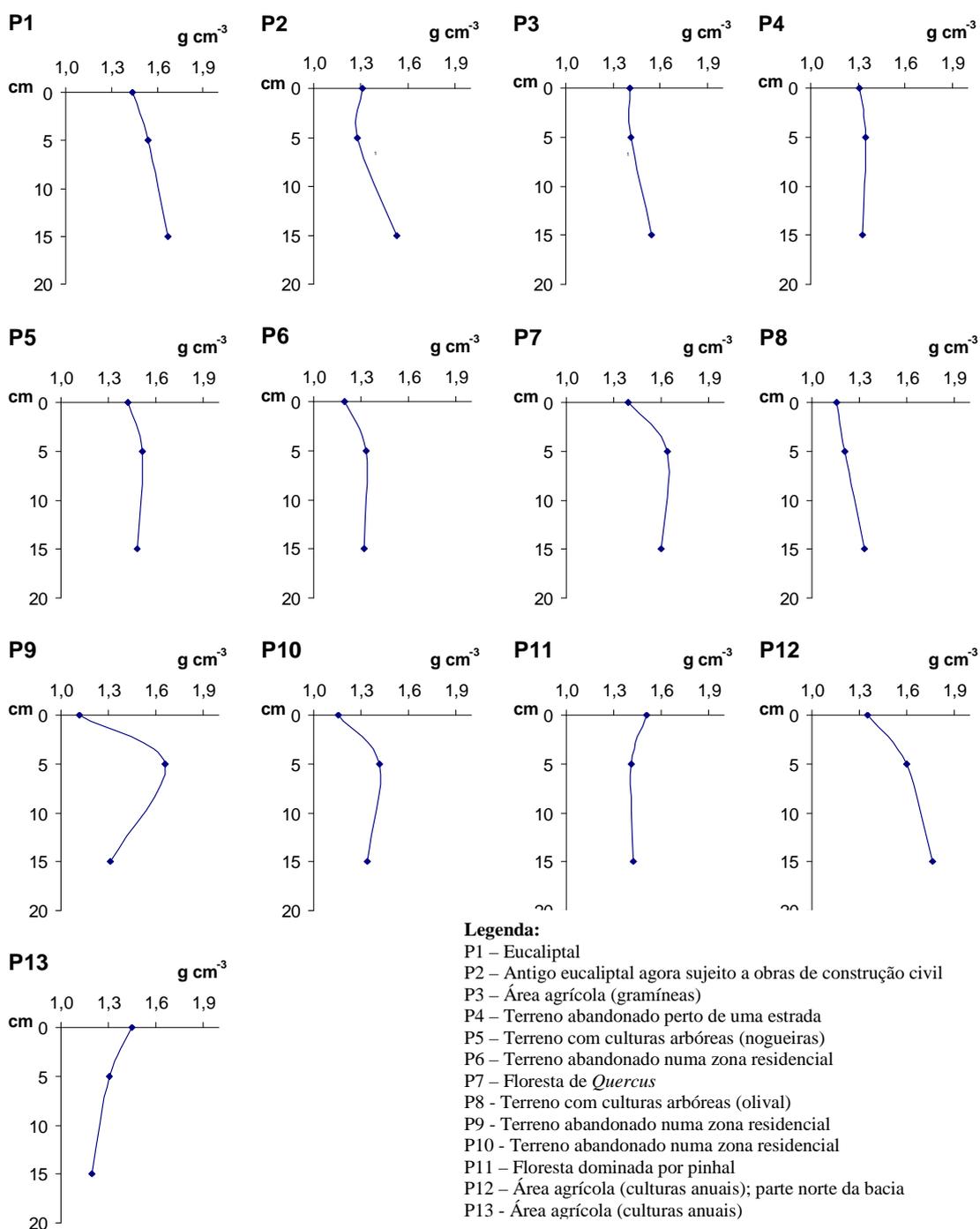


Figura 25 - Valores médios de densidade aparente do solo (g cm^{-3}) a diferentes profundidades (0-2 cm, 5-7 cm e 15-17cm), nos diferentes locais monitorizados.

De um modo geral, existem algumas diferenças, em termos de densidade aparente, entre os solos da bacia e, com tendência para aumentar em profundidade (à excepção de P11 e P12). A maior densidade nas camadas inferiores está associada à menor percentagem de matéria orgânica, maior compactação e/ou à presença de uma maior percentagem de material com dimensões superiores a 2mm (Ferreira, 1996; Costa, 1999).

Segundo a classificação de Casanellas & Reguerín (2005), os locais P8, P9 e P10 apresentam uma baixa densidade na camada superficial (inferior a $1,190 \text{ g cm}^{-3}$), enquanto os restantes locais revelam uma densidade média. À superfície do solo, os valores mais elevados encontram-se, por ordem decrescente, em P11, P13 e P1 ($1,508 \text{ g cm}^{-3}$, $1,452 \text{ g cm}^{-3}$ e $1,438 \text{ g cm}^{-3}$), enquanto nos restantes locais variam entre $1,195 \text{ g cm}^{-3}$ e $1,423 \text{ g cm}^{-3}$.

Os locais com maior densidade na camada superficial, P8 e P9, estão associados a solos arenosos de textura grosseira. Contudo, P13 (solo agrícola com culturas anuais) com a mesma classe textural, revelou um dos valores mais baixos de densidade aparente. P2 também com uma textura arenosa apresenta valores médios de $1,311 \text{ g cm}^{-3}$. Todos estes locais apresentam uma densidade bastante inferior a $1,600\text{-}1,760 \text{ g cm}^{-3}$, indicada para solos de textura arenosa (Alfani, 1967, *in* Casanellas & Reguerín, 2005). Os locais P1 e P11, com baixos valores de densidade aparente, apresentam textura argilo-limosa e franco-argilo-limosa, respectivamente. Para estas classes de textura, Alfani (1967, *in* Casanellas & Reguerín, 2005) refere valores abaixo de $1,230 \text{ g cm}^{-3}$, tendo os resultados obtidos sido bastante superiores. Para os solos franco-arenosos, o referido autor indica valores entre $1,440 \text{ g cm}^{-3}$ e $1,600 \text{ g cm}^{-3}$, nem sempre coincidentes com os resultados obtidos neste trabalho.

Em termos de perfil do solo, a densidade aparente aumenta, de um modo geral, em profundidade como resultado da compactação do solo. No entanto, em P9 (terreno abandonado numa zona residencial) a densidade aparente aumenta grandemente entre a camada de 0-2 cm e a camada subsuperficial (5-7 cm). Esta variação pode estar associada à variação da textura do solo, contudo, a camada analisada mais em profundidade (15-17 cm), com a mesma textura que a camada subsuperficial anterior, apresenta uma densidade bastante mais reduzida ($1,663 \text{ g cm}^{-3}$). Os resultados obtidos na camada de 15-17 cm em P9 e P10 e, nas camadas subsuperficial e mais profunda de P11, são difíceis de interpretar, pelo que se deve proceder a mais análises laboratoriais para confirmação dos resultados obtidos.

No caso de P2, por exemplo, a maior variação de densidade aparente acontece na camada mais profunda ($1,528 \text{ g cm}^{-3}$), o que pode estar associado ao efeito de compactação da intervenção de maquinaria pesada neste local.

No entanto, de acordo com Nunes (2007) o tipo de uso do solo apresenta uma relação significativa com a densidade aparente. De acordo com esta autora, o recurso a maquinaria pesada na lavragem do solo faz com que os primeiros 20-30 cm de terra sejam remexidos, destruindo a estrutura natural dos solos e promovendo a uniformização desta camada. No entanto, isto não parece observar-se nos solos agrícolas monitorizados na bacia hidrográfica em estudo (P3, P8, P12 e P13), uma vez que apenas em P8 a densidade na camada superficial é mais baixa e que não se observa grande homogeneidade ao longo do perfil. No entanto, as actividades de lavragem em P13 (área agrícola) podem de alguma forma estar relacionadas com a diminuição da densidade aparente em profundidade.

Ainda segundo Nunes (2007), o período subsequente ao abandono dos campos de cultivo traduz-se num incremento da densidade média, tanto à superfície como em profundidade. Contudo, este aumento não é destacado nos pontos P4 e P9 relativamente aos restantes locais monitorizados em áreas agrícolas.

Nas áreas urbanizadas (P6, P9 e P10) também não se observam maiores valores densidade, como resultado da compactação do solo. Relativamente às áreas florestais (P1, P7 e P11) também não parece haver uma relação nos valores de densidade. Deste modo, não é clara a influência do tipo de solo nos resultados obtidos, sendo outras as variáveis críticas.

Capacidade de retenção de água

A capacidade do solo para armazenar água e a sua capacidade de drenagem são aspectos importantes do ciclo hidrológico. A capacidade máxima para a água traduz a percentagem máxima de água que um solo pode conter e corresponde ao preenchimento total do espaço intersticial (pF 0). Por outro lado, a capacidade de campo (pF 2,0) traduz o conteúdo de água máximo disponível para absorção pelas plantas, uma vez que reflecte a ocupação de todos os microporos do solo com água. Na Figura 26 apresentam-se os resultados obtidos para estes dois parâmetros analisados.

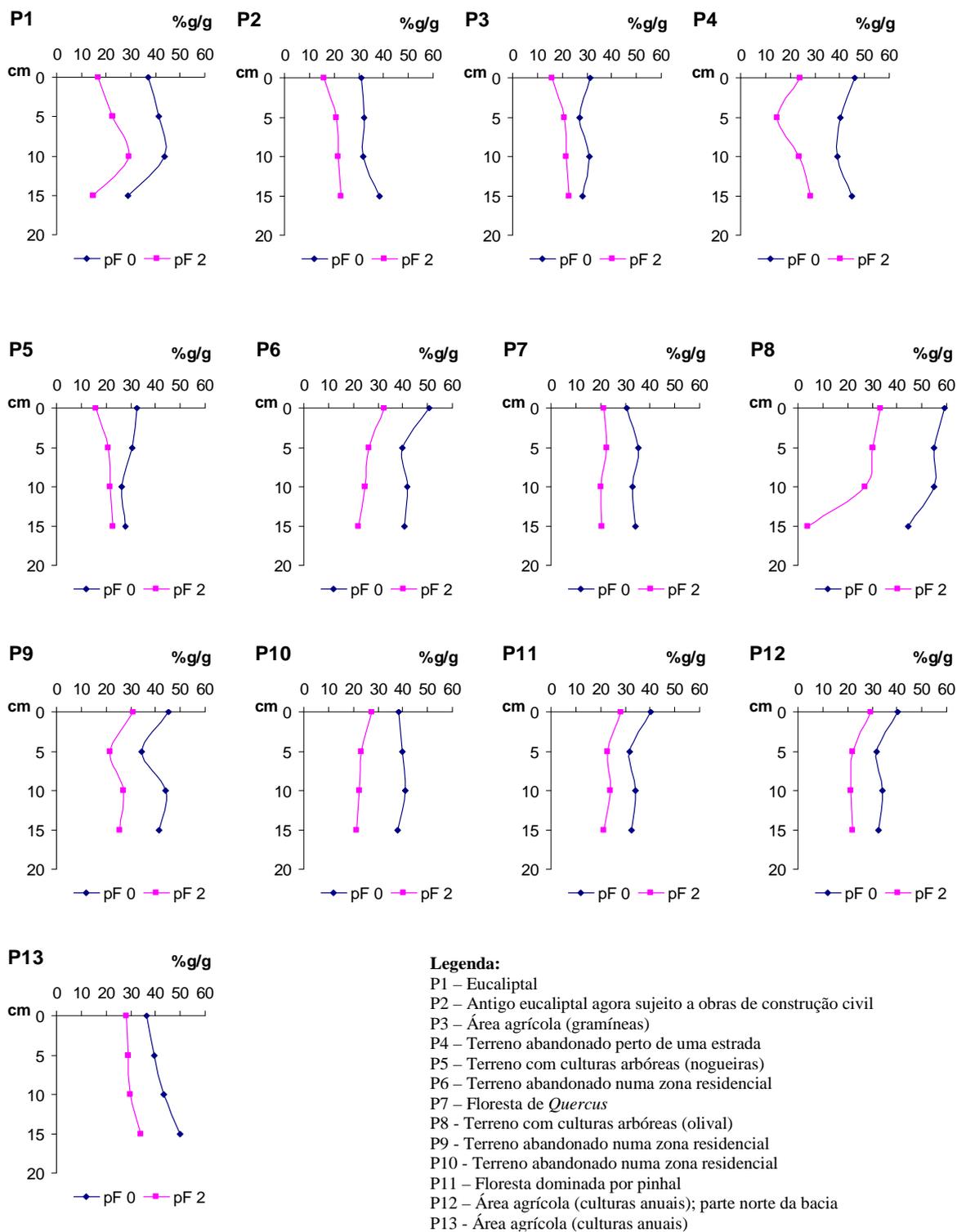


Figura 26 – Valores médios da capacidade máxima para a água (pF 0) e da capacidade de campo (pF 2), expressos em percentagem do peso de solo seco, a várias profundidades (0-5 cm, 5-10 cm, 10-15 cm e 15-20 cm), nos diversos pontos monitorizados.

O comportamento do solo relativamente à capacidade de retenção de água é bastante variável nos diversos locais e nas diferentes profundidades, observando-se por vezes aumento da capacidade de retenção de água em profundidade, claramente evidente em P13 (área com culturas anuais), e, noutros locais, como por exemplo P6, P8, P11 e P12, uma diminuição. De referir ainda que, em algumas situações, o comportamento da capacidade máxima para a água em profundidade não coincide com a evolução dos valores de capacidade de campo. Exemplos desta situação são os locais P5 (terreno com culturas arbóreas), onde o aumento da capacidade máxima para a água em profundidade, está associado a uma redução da capacidade de campo; no caso de P10 (terreno abandonado numa zona residencial), observa-se uma situação contrária, possivelmente devido à presença de macroporos.

O teor de água retido a pequenas sucções (até pF 2,0) dependente do efeito de capilaridade e da distribuição e dimensão dos poros. A densidade aparente afecta de forma acentuada a retenção de água pelo solo, visto estar relacionada com a porosidade, principalmente a macroporosidade (Ritsema, 1998).

A influência da textura do solo é muito grande, no entanto, solos da mesma classe de textura podem apresentar resultados diferentes, associados a diferenças granulométricas dentro da mesma classe, ao teor em matéria orgânica e óxidos de ferro, o tipo de argila, bem como a diferenças de micro-estrutura com elas relacionada, nomeadamente a consistência e plasticidade (Costa, 1999; Magalhães, 2000; Emerson *et al*, 2003).

Os locais que apresentam valores mais elevados de capacidade de retenção de água, máxima e de campo, são por ordem decrescente P8 (olival), P6 e P9 (terrenos abandonados em áreas residenciais). Estes resultados estão associados aos menores valores de densidade aparente, observando-se uma relação directa do comportamento em profundidade entre estes parâmetros. No entanto, P10 também com um dos valores mais baixos de densidade, não apresenta valores baixos de capacidade de retenção de água. De um modo geral, o comportamento da capacidade de retenção de água no solo, acompanha as variações de densidade aparente (relação inversa entre os dois parâmetros), com excepção dos pontos P2 (local com intervenção de maquinaria pesada) e P11 (pinhal), e P1 na camada entre os 15 e 20 cm de profundidade. No entanto, estes locais apresentam teores elevados de argila e elevada densidade aparente.

No que respeita aos resultados da capacidade de retenção de água e textura, a relação não parece ser tão clara, uma vez que solos com a mesma classificação granulométrica apresentam diferentes valores de pF. Veja-se, por exemplo, as distintas quantidades de água retida nos locais P3, P4, P5, P6 e P10, todos eles com textura franco-arenosa em todo o perfil de solo. Um outro exemplo pode ser dado pelos locais P8 e P9, que apresentam elevada capacidade de retenção de água na camada superficial, independentemente da sua textura arenosa e dos reduzidos teores de argila.

Os valores de capacidade de campo dos solos que apresentam uma camada superficial arenosa (P2= 15,9 g H₂O/100 g solo, P8= 33,3% e P13=28,2%), são bastante superiores aos 5% referidos por Costa (1999). Também os resultados obtidos em solos argilosos (P1) são bastante inferiores aos 40% apontados pelo mesmo autor (16,8% na camada superficial).

Relativamente à relação entre o pF e o teor de matéria orgânica, verifica-se alguma afinidade entre os solos com maior quantidade de matéria orgânica (P4, P6 e P9) e elevado pF. Contudo, solos extremamente pobres (P2 e P8) apresentam distintos comportamentos em termos de pF. P2, localizado numa área submetida a obras de construção apresenta uma baixa capacidade de água no solo, enquanto P8 (olival) revelou elevados valores de pF, o que pode estar associado ao efeito da lavragem do terreno, pelo que o uso do solo pode ser um factor importante.

5.2.1.2 – Características químicas

pH

O pH é considerado a mais importante propriedade química do solo, determinando o comportamento e evolução das suas componentes químicas, assim como a actividade e funções dos seres vivos presentes (Nunes, 2007). Deste modo, o pH é susceptível de influenciar indirectamente a hidrologia dos solos, uma vez que está relacionado com o desenvolvimento de seres vivos, que influenciam os processos hidrológicos, através da retenção de água ou da criação de canais no solo que permitem a sua passagem.

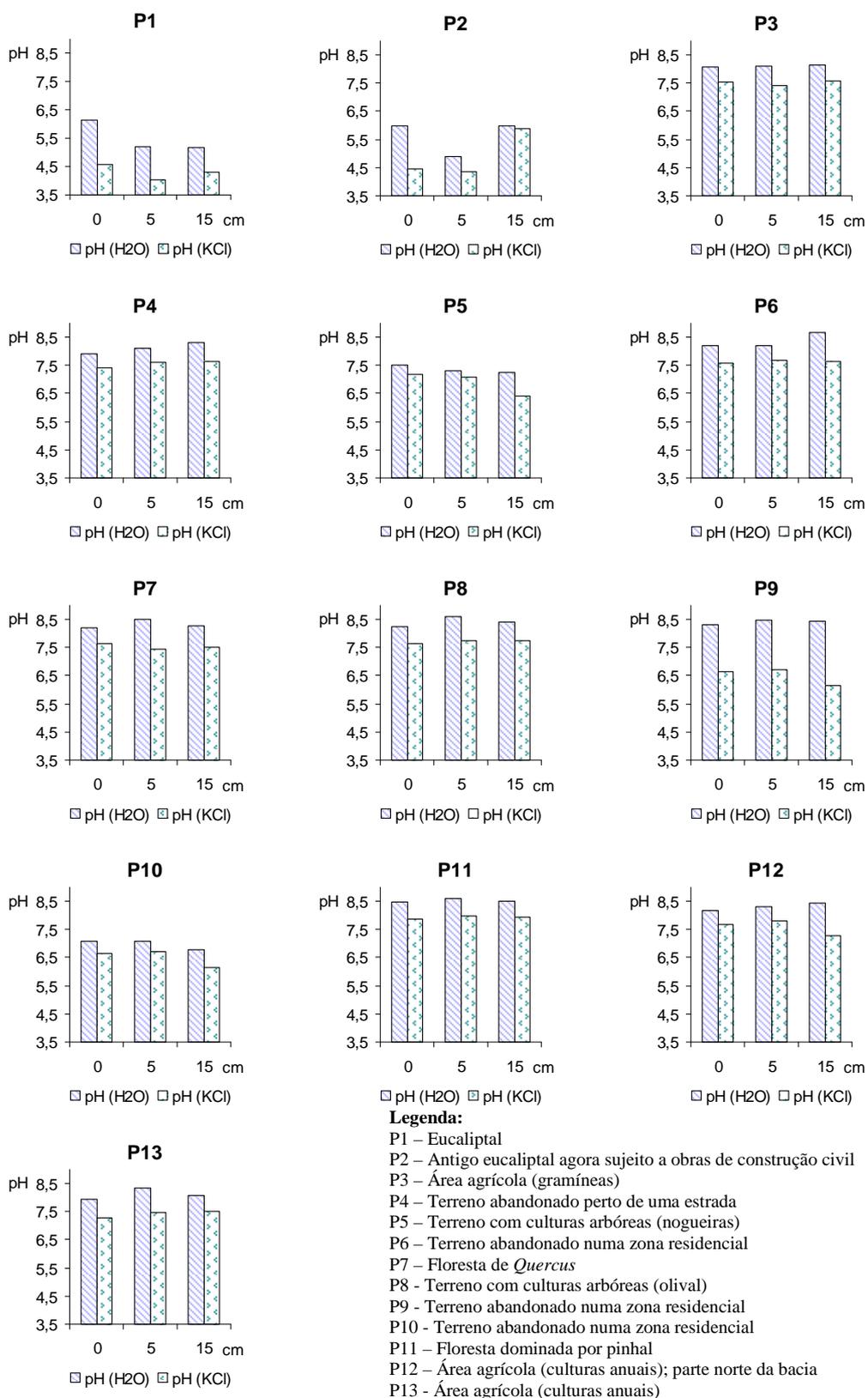


Figura 27 - Valores de pH em H₂O e KCl a diferentes profundidades (0-2cm, 5-7 cm e 15-17cm), nos diferentes pontos monitorizados.

Os resultados da Figura 27 revelam valores de pH em água sempre superiores aos de pH em solução de KCl, uma vez que reflectem em parte uma mobilização de acidez potencial, dadas as reacções de troca entre o catião do sal e os iões do solo. No entanto, segundo Costa (1999) o pH do solo em solução de KCl está associado a valores mais constantes no mesmo solo e por isso, presumivelmente, mais característicos. É provável que os valores assim obtidos se aproximem mais do valor do pH prevalecente na superfície das partículas terrosas do que o obtido quando a determinação é feita em água.

Assim, tendo em consideração os resultados em KCl e de acordo com a escala de Pratalongo (Costa, 1999), os solos dos locais P1 e P2 são hiperácidos ($\text{pH} \leq 4,5$), por oposição aos solos subalcalinos encontrados em P11, P12 e P13 (pH entre 7,6 e 8,5). Os restantes locais analisados apresentam um pH neutro (entre 6,6 e 7,5). A perda de bases por lixiviação constitui a causa mais importante do desenvolvimento da acidez do solo.

Os resultados obtidos, não apresentam variações significativas ao longo do perfil, com excepção de P2, que indica na camada localizada entre os 15 e 17 cm de profundidade, um aumento dos valores de pH, que se traduzem em condições subácidas (entre 5,6 e 6,5). Contudo, estes resultados devem ser confirmados através da recolha e análise de maior número de amostras, uma vez que não são compreensíveis os resultados obtidos.

Contudo, se forem considerados os resultados da acidez potencial, a classificação é completamente diferente, passando a considerar-se P1 e P2 como solos subácidos e P10 como neutro, enquanto os restantes pontos apresentam um carácter subalcalino. Salienta-se ainda a maior diferença verificada no local P9 (terreno abandonado numa área residencial) entre os resultados dos dois métodos para a determinação de pH.

De um modo geral, os resultados parecem revelar alguma relação com a litologia do local, observando-se solos mais alcalinos nas áreas calcárias (P6, P7, P8, P9, P11 e P12) e, mais ácidos nas áreas de arenitos (P1, P2 e P10). Contudo, P4, localizado num terreno abandonado próximo de uma estrada, apesar de se situar numa área de arenitos apresenta um pH elevado. Os locais P3, P5 e P13 localizados em zonas de confluência entre as áreas calcárias e areníticas apresentam valores intermédios.

Os locais P1 e P2 são os que apresentam valores mais baixos de pH, o que pode estar associado ao tipo de húmus presente (Ritsema, 1998), tendo em consideração que estes solos se localizam numa área de floresta mista de eucalipto e pinheiro, embora P2 tenha

sofrido um processo de desflorestação. Nos restantes locais as variações não parecem ser significativas, não revelando diferenças entre os diferentes tipos de uso do solo.

Matéria orgânica

A matéria orgânica do solo é geralmente reconhecida como uma das componentes químicas essenciais da qualidade do solo e, desempenha um papel importante na formação de agregados no solo e no aumento da porosidade, através da acção das substâncias húmicas e de células microbianas. Por outro lado, aumenta a capacidade de retenção de humidade assim como a entrada e circulação de água (Nunes, 2007).

Os resultados do teor de matéria orgânica nos diversos locais analisados são apresentados na Figura 28.

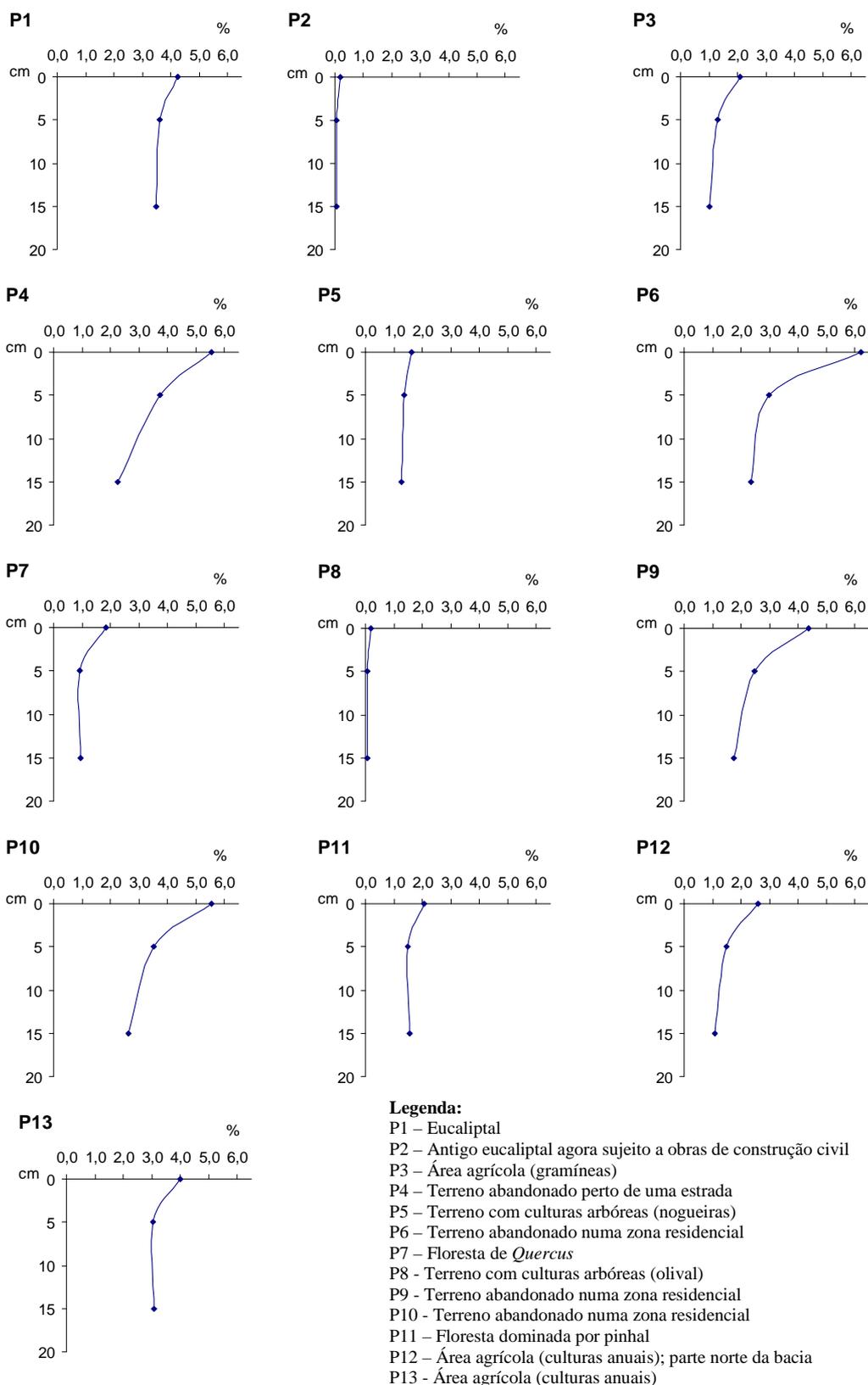


Figura 28 - Resultados do teor de matéria orgânica (%) a diferentes profundidades (0-2cm, 5-7 cm e 15-17cm), nos diferentes locais monitorizados.

De um modo geral, os solos dos locais P2 e P8 evidenciam uma extrema pobreza, em termos de concentração de matéria orgânica, com valores inferiores a 2%. Tal como seria de esperar, todos os locais apresentam uma redução do teor de matéria orgânica em profundidade, como consequência dos menores *inputs* de material orgânico.

A extrema pobreza identificada em P2 está associada ao facto de toda a área florestal ter sido destruída e acompanhada de remoção da camada mais superficial do solo, para efeitos de construção de um parque tecnológico. Relativamente aos baixos valores encontrados em P8 (olival), podem estar associados à lavragem do terreno.

O local P11 apesar de se localizar num solo florestal, essencialmente constituído por pinhal, não apresenta teores elevados de matéria orgânica, o que pode resultar, apesar da abundância de biomassa, de uma elevada razão carbono/azoto, associada à lenta mineralização dos resíduos resinosos e fraca libertação de azoto mineral (Nunes, 2007). Em P1, zona de floresta mista de eucalipto e pinhal, registaram-se concentrações de matéria orgânica na ordem dos 4%, bastante superiores aos valores identificados em P11.

No que respeita aos locais P4, P6, P9 e P10 encontraram-se teores de matéria orgânica elevados na camada superficial, diminuindo acentuadamente em profundidade. Estes locais correspondem a terrenos abandonados, onde a cobertura herbácea proliferou livremente sem a intervenção humana. Também Nunes (2007) verificou que as parcelas com vegetação e há mais tempo imperturbadas pelas actividades antrópicas, possuíam maiores teores de matéria orgânica. Ferreira (1996) referia, igualmente, que a quantidade de matéria orgânica no solo, bem como a sua distribuição ao longo do seu perfil é, geralmente, função do tipo de uso do solo e do tipo de actuação sobre o mesmo, bem como do período de tempo ocorrido desde essa actuação.

5.1.2 – Variação temporal de algumas propriedades hidrológicas

Os principais objectivos deste subcapítulo centram-se na avaliação da dinâmica espacial e temporal do teor de humidade e hidrofobia a três profundidades (0-2 cm, 5-7 cm e 15-17 cm), bem como da taxa de infiltração e condutividade hidráulica na camada superficial. Estes parâmetros foram avaliados nos 13 locais monitorizados dentro da bacia da ribeira dos Covões, em quatro períodos temporais: Abril, Maio, Junho e Julho de 2008.

Humidade

A humidade do solo é um dos principais elementos do ciclo hidrológico, desempenhando um papel fundamental na elaboração dos balanços de água, na medida em que determina as taxas de infiltração, percolação e escoamento superficial. Os resultados são apresentados na Figura 29.

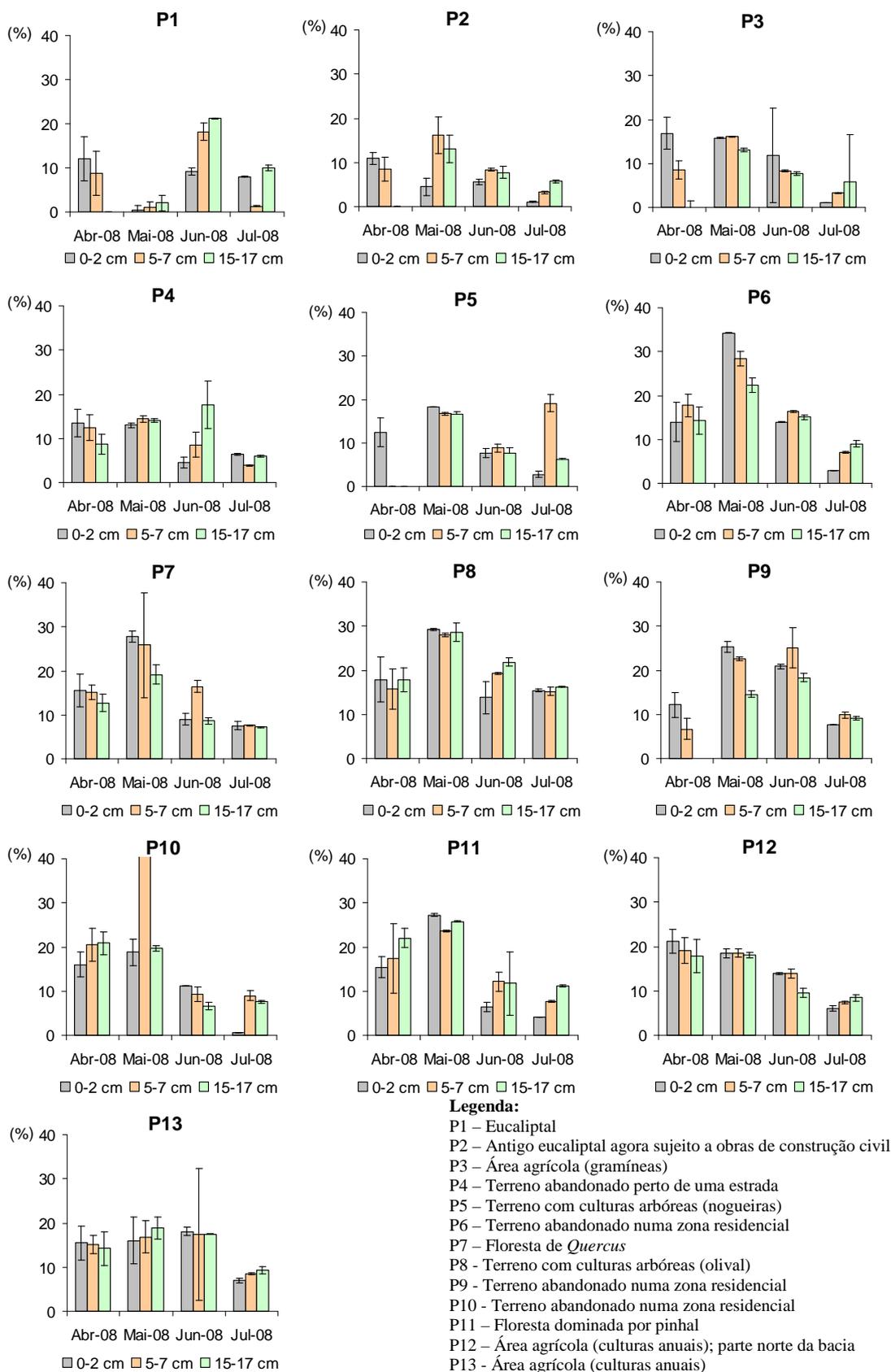


Figura 29 - Valores de humidade médios (%) e desvio padrão, ao longo do tempo, nos vários locais monitorizados.

A partir da Figura 29, observam-se distintos comportamentos, em termos de humidade do solo, para os diferentes locais, ao longo do tempo e, ainda, a diferentes profundidades. A camada superficial nem sempre apresenta valores de humidade mais elevados, por exemplo, em P2 (eucaliptal), apenas em Abril a humidade foi superior na camada superficial. Por outro lado, para o mesmo local as tendências de humidade também não se mantêm ao longo do tempo, por exemplo, em P1, a camada superficial apresentou valores de humidade mais elevados em Abril, enquanto que no mês seguinte foi a que apresentou valores mais reduzidos. Contudo, os resultados obtidos em Maio no local P1 são difíceis de compreender, podendo estar associados a problemas de medição do TDR, que se vieram a confirmar mais tarde.

Segundo Nunes (2007), o teor de humidade num determinado local é influenciado por um conjunto de factores, entre os quais se destacam a precipitação e a temperatura antecedente. Neste sentido, procurou relacionar-se os resultados obtidos ao longo do tempo com as condições climáticas antecedentes (Figura 30).

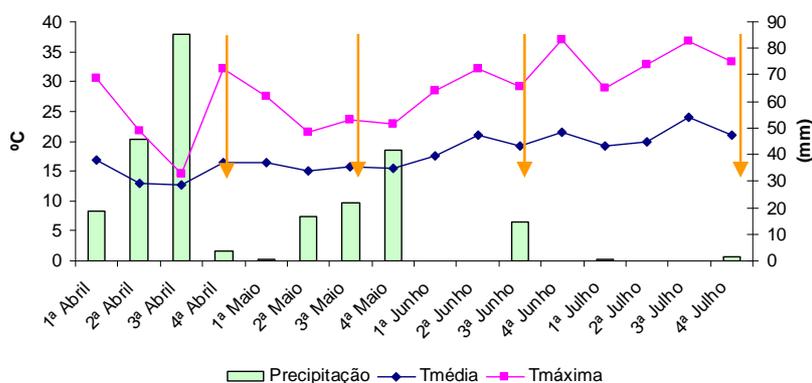


Figura 30 – Evolução semanal da precipitação e temperaturas média e máxima diária, entre Abril e Julho de 2008, com indicação dos períodos de monitorização realizados.

As campanhas de monitorização foram realizadas após a queda de 78,8 mm de precipitação nos 8 dias antecedentes à monitorização de Abril (dias 25 e 26), 32,8 mm antes da monitorização de Abril (22 e 23), 14,6 mm antes da realizada em Junho (21 e 22) e apenas 1,4 mm anteriormente à monitorização de Julho (30 e 31). A diminuição da precipitação e aumento da temperatura no decurso do período em estudo, parece reflectir-se em menores valores de humidade do solo.

Tal como acima referido, no local P2 (local de construção do parque tecnológico), observa-se que apenas em Abril a camada superficial apresentou teores de humidade mais elevados, registando valores inferiores nas monitorizações seguintes. Este facto pode estar associado à variação da classe textural: arenosa na camada superficial e franco-arenosa em profundidade. Uma vez que a capacidade de retenção de água nos solos arenosos é menor, podemos compreender o aumento de humidade em profundidade. No que respeita aos resultados de Abril, estes podem reflectir a saturação das camadas subsuperficiais, como resultado da maior precipitação antecedente. Também em P9 (terreno abandonado), com o mesmo tipo de textura, apresenta o mesmo comportamento em termos de humidade, com excepção do teor de humidade na camada superficial registado em Maio, mais elevada que nas restantes profundidades.

Por outro lado, P13 com uma textura arenosa em todo o perfil monitorizado, apresenta valores de humidade bastante superiores a P1, por exemplo, com um solo argiloso, apesar do menor declive deste último. A proximidade do ponto P13 à linha de água pode também explicar os elevados valores de humidade, tendo em consideração a classe textural do solo. No entanto, P4 e P5, localizados também próximo da linha de água principal, e com um solo franco-arenoso em todo o perfil, apresentam, de um modo geral, valores de humidade inferiores a P13. Porém, estes resultados podem estar associados ao menor declive de P13.

Todavia, também P3, P6, P8 e P10 apresentam textura franco-arenoso em todo o perfil, e revelaram teores de humidade diferentes e comportamento diferentes ao longo do perfil. P8 ostenta valores de humidade elevados, comparativamente com os outros com o mesmo tipo de textura. Situa-se numa área agrícola plana, próximo de uma linha de água efémera e num local ensombrado por uma área de mato e floresta envolvente e, com um declive superior que provoca uma menor exposição solar. P10 foi o local que revelou maiores teores de humidade, localizando-se junto a uma área urbana, num local sem exposição característica de sol.

Comparando P7 e P12, ambos localizados junto a linhas de água com um regime de escoamento intermitente e solo com a mesma textura (franco-argilo-arenoso), verifica-se que, de um modo geral, P12 com um uso de solo agrícola, apresenta teores de humidade superiores a P7, com um uso florestal, o que se pode dever à menor intercepção da precipitação por parte da vegetação.

Tendo em consideração os diferentes factores envolvidos, não parece existir uma relação directa entre o teor de humidade do solo e o tipo de uso. De facto, segundo Famiglietti *et al.* (1998), ainda não existe uma visão coerente da variabilidade espacial da humidade do solo e dos factores que a controlam, pois os resultados obtidos são, por vezes divergentes e até contraditórios. Contudo, deve ter-se em consideração que nas áreas agrícolas, em especial nas que ostentam culturas anuais (P12 e P13), os teores de humidade podem reflectir acções de irrigação durante os períodos de maior secura.

Hidrofobia

A hidrofobia reduz a afinidade do solo para com a água de tal modo que pode resistir ao humedecimento durante períodos variáveis de tempo, estando associada, nomeadamente, à diminuição da capacidade de infiltração do solo e ao aumento do escoamento superficial (Doerr *et al.*, 2000; Matias, 2002). Na Figura 31 são apresentados os resultados da avaliação das propriedades hidrofóbicas nos diferentes locais monitorizados.

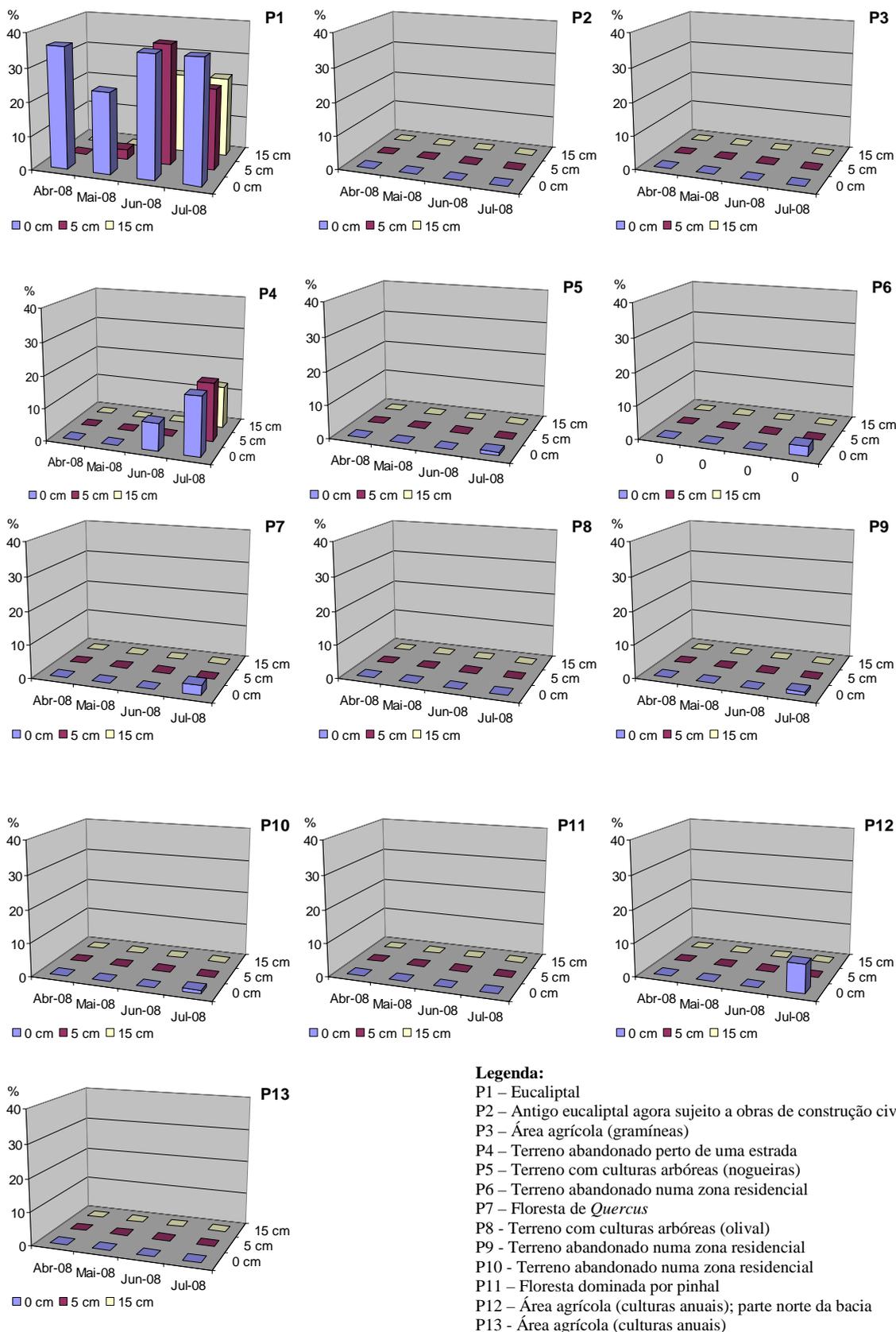


Figura 31 - Valores de % de etanol utilizados nos testes de hidrofobia dos solos, ao longo do tempo, nos vários pontos monitorizados.

De um modo geral, observa-se que a maioria dos solos monitorizados nos diversos pontos apresentam um comportamento hidrofílico, com excepção de P1, quase sempre extremamente hidrofóbico, especialmente na camada superficial. Salienta-se ainda o desenvolvimento de alguma hidrofobia nos locais P4, P5, P6, P9, P10, P12 e em profundidade em P1, durante o verão, associada a teores de humidade do solo mais reduzidos.

P1 localiza-se numa área de floresta mista de eucalipto e pinhal. Neste local, a presença de manta morta à superfície da camada mineral, a que se associam teores de matéria orgânica relativamente mais elevados, terão promovido a formação de uma camada repelente à água: sempre extremamente hidrofóbico, com excepção de Maio, período em que revelou ser severamente hidrofóbico. Segundo Ritsema (1998), as substâncias hidrófobas, associadas a uma fracção de matéria orgânica com um baixo grau de humificação, desempenham aqui um importante papel. No período de Maio, a diminuição da hidrofobia registada na camada superficial, apesar dos menores teores de humidade do solo, foi acompanhada de um aumento da hidrofobia na camada subsuperficial de 5 cm (ligeiramente hidrofóbico). Este facto parece revelar a migração das substâncias superficiais activas da superfície do solo, que podem conter ácidos húmicos e fulvicos, para camadas mais profundas do solo (5 cm). De acordo com Doerr *et al.* (2000), a hidrofobia pode ser ultrapassada se as substâncias que provocam a repelência à água migrarem do solo para a água, até que a tensão superficial da água seja suficientemente reduzida para permitir a infiltração.

Segundo Buczko & Huttl (2006), a hidrofobia em solos florestais depende, entre outros factores, da espécie de árvores (tipo de floresta), idade da floresta, época do ano, do teor de humidade do solo, do conteúdo em matéria orgânica e do seu tipo, do conteúdo em argila, da variação entre os períodos de secura e humidade do solo, bem como da temperatura e humidade relativa do ar ambiente. Assim, tendo em consideração os inúmeros factores envolvidos no desenvolvimento de repelência à água, pode perceber-se as diferenças encontradas entre os diversos usos florestais monitorizados, nomeadamente no local P7 (essencialmente carvalhos) e P11 (essencialmente pinhal).

Os solos que revelaram uma ligeira hidrofobia na camada superficial em Julho (P5, P6, P7, P9 e P10) e forte hidrofobia (P12) apresentam diferentes texturas e estão associados a diferentes tipos de uso. Assim, não parece observar-se nenhuma relação entre a hidrofobia

e a textura, tal como verificado por alguns autores, que referem que solos com textura mais grosseira (arenosa) podem adquirir uma camada hidrofóbica mais espessa e intensa que os solos de textura mais fina (argilosa), devido à menor área superficial por unidade de volume, o que diminui a superfície das partículas minerais do solo cobertas pela recristalização dos metais polivalentes (Ferreira, 1996; Ritsema, 1998; Doerr *et al.*, 2000; Rodríguez-Alleres *et al.*, 2007). DeBano (1991) concluiu que a hidrofobia é principalmente desenvolvida em solos com um conteúdo inferior a 10% de argila. Por outro lado, Doerr *et al.* (2000), encontraram solos com conteúdos de argila de cerca de 25% a mais de 40% com repelência extrema à água, tendo sido sugerido que isto possa acontecer devido à formação de agregados por parte da argila, reduzindo assim a área superficial a ser coberta pela camada hidrofóbica.

Contudo, alguns estudos também indicaram repelência à água nas fracções finas do solo, e em alguns casos até num grau mais elevado. Assim, foi sugerido por Doerr *et al.* (2000), que a matéria orgânica particulada, hidrofóbica, seja ela própria relativamente fina, promovendo ao grau de repelência nas fracções finas. Por outro lado, em alguns ambientes, o fornecimento de materiais hidrofóbicos pode ser suficientemente elevado não só para cobrir as partículas mais grosseiras, mas também para cobrir as partículas de dimensões mais pequenas com uma camada orgânica.

De referir ainda que, no local P4, em Julho, foi desenvolvida a repelência à água em todas as camadas de solo monitorizadas, com um grau severamente hidrofóbico aos 0 cm e 5 cm e, fortemente hidrofóbico aos 15 cm de profundidade. Estes resultados podem estar associados não apenas ao menor teor de humidade do solo, mas também à sua proximidade com uma estrada, onde a emissão de hidrocarbonetos por parte dos veículos rodoviários pode ser responsável pelo aparecimento de substâncias hidrófobas.

Taxa de infiltração e condutividade hidráulica

Os resultados dos ensaios realizados no campo para determinação da taxa de infiltração na camada superficial do solo são apresentados na Figura 32.

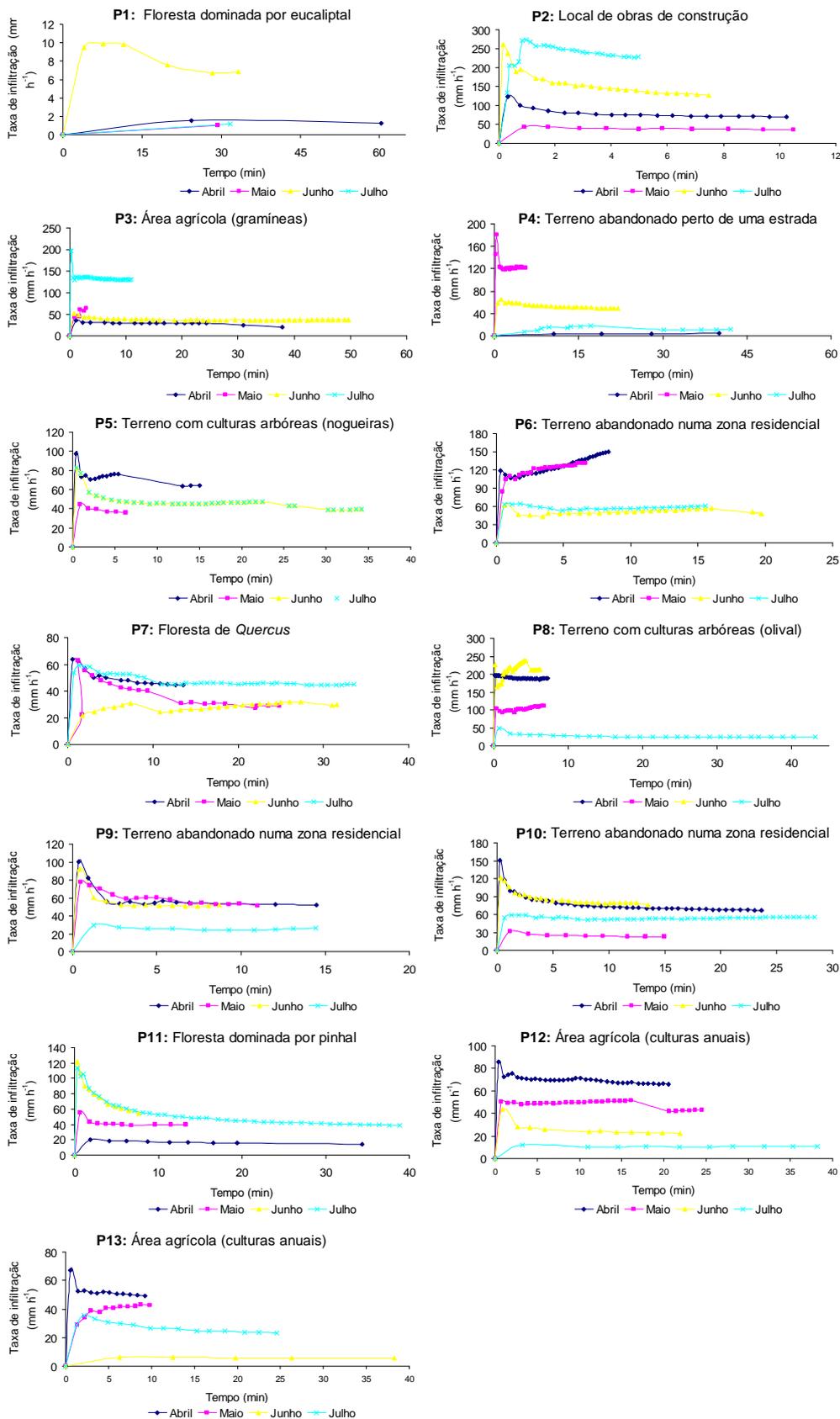


Figura 32 – Variações nas taxas médias de infiltração ao longo do tempo, nos vários ensaios.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 32, observam-se grandes diferenças nas taxas de infiltração dos diferentes locais, bem como variações associadas aos diferentes períodos monitorizados. As diferenças nas taxas de infiltração obtidas são tão grandes, que variam na ordem dos 1 mm h^{-1} , em P1 (eucaliptal), e os 250 mm h^{-1} , registados em P2 (área em construção).

No entanto, todos os ensaios revelaram, de forma mais ou menos clara, uma fase inicial relativamente rápida, diminuindo depois gradualmente o volume que se infiltra num dado período de tempo. Parte do movimento inicial dá-se facilmente sob a acção da gravidade, pelos macroporos, correspondentes à porosidade designada não capilar. Ao mesmo tempo a água vai penetrando mais lentamente, em vários sentidos, na porosidade dita capilar, para a qual o gradiente de tensão de humidade desempenha o papel principal no movimento da água, e a permeabilidade é bastante menor. À medida que a infiltração prossegue, a taxa de infiltração vai-se reduzindo, nomeadamente, devido à gradual redução do gradiente de tensão na espessura humedecida, bem como à resistência oposta pelo ar comprimido pela água em espaços intersticiais, até atingir um valor constante (Costa, 1999).

Segundo Casanellas & Reguerín (2005), valores de infiltração inferiores a 1 mm h^{-1} , como se verificou no local P1, estão associados a um risco elevado de erosão em encostas. Valores de infiltração moderadamente lenta ($5\text{ mm h}^{-1} - 20\text{ mm h}^{-1}$) foram registados em P11 (pinhal) no mês de Abril, P12 (área agrícola) no mês de Julho e em P13 (área agrícola) no mês de Junho. Velocidades moderadas ($20\text{ mm h}^{-1} - 60\text{ mm h}^{-1}$) foram as mais registadas: P2 em Maio, todas as monitorizações efectuadas em P3, com excepção do mês de Julho, P4 em Julho, todos os pontos de P7, P8 e P9 em Julho, P10 em Maio e Julho, P11 em Maio, P12 em Maio e Junho e, ao longo do tempo em P13, com excepção do mês de Junho. Taxas de infiltração moderadamente rápidas ($60\text{ mm h}^{-1} - 125\text{ mm h}^{-1}$) foram identificadas em P2 (área em construção), P5 (área com culturas arbóreas) e P12 (área agrícola) apenas no mês de Abril, P4 (terreno abandonado) em Maio, e, sempre em P6 (terreno abandonado) com excepção de Junho, P9 (terreno abandonado) com excepção de Julho e P10 (terreno abandonado) com excepção de Maio. Velocidades de infiltração rápidas ($125\text{ mm h}^{-1} - 250\text{ mm h}^{-1}$) foram identificadas em P2 (área de construção) nos meses de Junho e Julho, em P3 (área agrícola) no mês de Julho, P4 (terreno abandonado)

em Maio e, em P8 (olival) nos meses de Abril e Junho. No que respeita a velocidades de infiltração muito rápidas ($>250 \text{ mm h}^{-1}$) apenas se observaram em P2 (área em construção) no mês de Julho. Os resultados revelam assim uma grande variabilidade espacial e temporal da infiltração de água no solo.

As características do solo, relativas à infiltração são influenciadas por um largo número de factores. Salientam-se, entre os mais importantes o tipo de uso do solo (Zimmermann *et al.*, 2005; Nunes, 2007), o tipo e a densidade do coberto vegetal (Cerdà, 1996; Ferreira, 1996), a presença de crostas na superfície ou subsuperfície e a actividade biológica relacionada com a macroporosidade (Ferreira, 1996; Ritsema, 1998). Outros autores referem a pedregosidade dos solos (Figueiredo, 2001, Cerdà, 1996), o declive, exposição, porosidade (que depende da textura e estrutura) e a humidade do solo antecedente (Molchanov, 1963; Cerdà, 1996; Ceballos, 1999; Nunes, 2007).

A velocidade de água no solo pode ainda ser expressa em termos de condutividade hidráulica, ou permeabilidade, cujos resultados médios dos diversos ensaios e o respectivo desvio padrão se apresentam na Figura 33, o que facilita a análise dos dados.

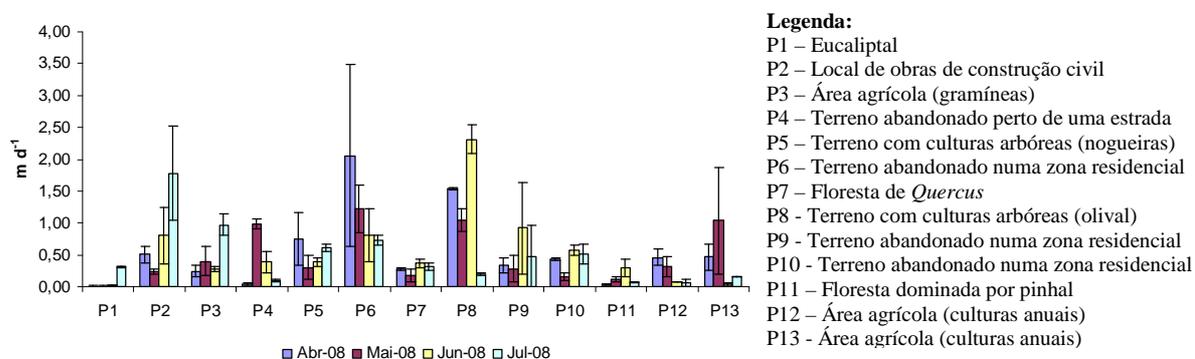


Figura 33 - Valores médios e desvio padrão de condutividade hidráulica dos vários pontos monitorizados, ao longo do tempo.

De acordo com a classificação proposta por Casanellas & Reguerín (2005), em P1 (eucaliptal) a condutividade hidráulica é classificada, com base nos valores médios, quase sempre como baixa (condutividade hidráulica entre $0,000864$ e $0,00864 \text{ m d}^{-1}$), tendo aumentado para moderadamente baixa ($0,00864 - 0,0864 \text{ m d}^{-1}$) no mês de Julho. Nos locais P2 (área em construção) e P3 (área agrícola), com comportamentos semelhantes, apresentaram sempre uma condutividade hidráulica moderadamente elevada ($0,0864 - 0,864 \text{ m d}^{-1}$), com excepção do último mês que registou valores elevados ($0,864 - 8,64 \text{ m d}^{-1}$).

d⁻¹). P5 (área com culturas arbóreas) e P7 (floresta de *Quercus*), também apresentaram resultados semelhantes e sempre constantes ao longo do tempo – valores moderadamente elevados. O local P4 (terreno abandonado) revelou grandes variações ao longo do tempo, com uma classificação moderadamente baixa em Abril, elevada em Maio e, moderadamente elevada em Junho e Julho. P6 (terreno abandonado) acusou nas duas primeiras monitorizações valores de condutividade hidráulica elevados, que se reduziram para moderadamente elevados em Junho e Julho. Em P9 (terreno abandonado), por outro lado, revelou sempre valores moderadamente elevados, com excepção do mês de Junho, que revelou valores elevados de condutividade hidráulica. No local P11 (pinhal), a condutividade também variou ao longo do tempo, entre moderadamente baixa em Abril e Julho e moderadamente elevada em Maio e Julho. Já o local P12 (área agrícola), indicou valores moderadamente elevados nas duas primeiras campanhas de monitorização, e moderadamente baixa condutividade hidráulica nas últimas. O local P13, correspondente também a uma área agrícola, apresentou uma grande variabilidade ao longo do tempo. Podemos então dizer que, de um modo geral, os terrenos abandonados e as áreas agrícolas registaram taxas de infiltração mais elevadas. No olival (P8) as elevadas taxas de infiltração podem ser favorecidas pelas actividades de lavragem do terreno.

No que respeita à conexão da taxa de infiltração/condutividade hidráulica com a humidade, verifica-se que existe uma relação inversa entre estes parâmetros nos locais P3 (área agrícola com gramíneas) e P11 (pinhal), ou seja, a maior infiltração está associada ao menor teor de humidade do solo, que se traduz numa maior disponibilidade dos espaços intersticiais do solo para receberem água. Contudo, em P9 (terreno abandonado) e P12 (área agrícola), observou-se o contrário, ou seja, que a infiltração diminui com a redução de humidade do solo, pelo que o uso do solo pode desempenhar um papel importante taxa de infiltração.

No entanto, parece existir uma relação entre a taxa de infiltração e o grau de repelência do solo à água. De facto, vários autores referem como um dos mais frequentes impactos da hidrofobia a redução da capacidade de infiltração no solo e o aumento do escoamento superficial terrestre (Crockford *et al.*, 1991; Imerson *et al.*, 1992; Shakesby *et al.*, 1993; Doerr *et al.*, 2000). Esta relação pode ajudar a compreender as reduzidas taxas de infiltração verificadas no local P1 (eucaliptal), onde o grau de hidrofobia atingiu os valores

mais elevados, tendo mesmo sido necessário várias semanas e a utilização de etanol para conseguir saturar com água as amostras aqui recolhidas. Por outro lado, o desenvolvimento da repelência nos locais P4, P6 e P12, em especial no mês de Julho, podem também estar relacionados com a redução da taxa de infiltração. Segundo Costa (1999), em solos relativamente secos a taxa de infiltração é, normalmente, mais elevada do que em solos mais húmidos, devido ao elevado gradiente de tensão. Com efeito, excepto nos espaços suficientemente grandes, o solo não saturado oferece resistência mais elevada que o solo saturado.

Os resultados obtidos também não parecem revelar uma clara relação com a textura do solo, uma vez que para o mesmo local, as variações na condutividade hidráulica são, por vezes, bastante elevadas. No entanto, comparando os resultados obtidos com os dados apresentados por Casanellas & Reguerín (2005), que relacionam as classes de textura com a condutividade hidráulica do solo, verifica-se que no eucaliptal (P1), com uma textura argilo-limosa na camada superficial, apresenta valores de condutividade bastante diferentes do intervalo de valores sugerido para este tipo de solos: 0,06-0,12 m d⁻¹. Relativamente aos valores apontados para solos franco-arenoso (1,5 m d⁻¹ – 3 m d⁻¹) apenas foram confirmados em P6 (terreno abandonado) nas monitorizações de Abril e Maio, tendo os locais P3 (terreno agrícola), P4, P5, P6 e P10 (terrenos abandonados) apresentado resultados bastante diferentes. Contudo, os valores de condutividade hidráulica indicados para solos franco-argilo-arenosos (0,12 m d⁻¹– 0,5 m d⁻¹) foram verificados nos ensaios em P7 (floresta de *Quercus*) e em P12 (área agrícola) apenas nas campanhas de Abril e Maio. Nos solos argilosos monitorizados (P11), apenas nas campanhas de Maio e Julho se confirmaram os valores entre 0,06 m d⁻¹ e 0,12 m d⁻¹. Por outro lado, todos os locais com textura arenosa (P2, P8, P9 e P13) revelaram valores muito aquém dos propostos por Casanellas & Reguerín (2005): superior a 12 m d⁻¹. Contudo, os locais P1, P7, P11 e P12 registaram os valores mais baixos de infiltração, tal como sugerido durante a análise granulométrica.

Tendo em consideração as grandes variações registadas ao longo do tempo dentro da bacia, também não parece existir uma relação entre os valores de condutividade hidráulica e os tipos de uso do solo, tal como sugerido por Zimmermann *et al.* (2005). Podemos para tal tomar como exemplo os locais P6 e P10, terrenos abandonados localizados em áreas

urbanas, e com valores completamente diferentes entre si, tal como acontece com os usos do solo florestais (P1, P7 e P11).

5.1.3 – Relações entre variáveis

Com o intuito de perceber a inter-relação entre as principais variáveis hidrológicas e as características físicas e químicas do solo, foi aplicado o coeficiente r-Pearson aos resultados da campanha de monitorização de Maio de 2008, uma vez que foi nesta que se procedeu à colheita de amostras de solo para análise. As inter-relações entre variáveis foram avaliadas para as três profundidades de solo monitorizadas (0-2 cm, 5-7 cm e 15-17 cm), no sentido de perceber se existem diferenças ao longo do perfil. De referir apenas que as tabelas com os resultados das correlações se apresentam no Anexo VI.

Neste subcapítulo apenas nos focamos nas inter-relações com os parâmetros condutividade hidráulica, humidade do solo, capacidade máxima para a água e capacidade de campo, uma vez que influenciam directamente parâmetros hidrológicos como a infiltração, drenagem e percolação (Franco & Lencastre, 2006). No entanto, tendo em consideração as implicações da hidrofobia nos processos hidrológicos, referidas no subcapítulo 5.1.2, referem-se ainda as inter-relações estatísticas com este parâmetro.

A *condutividade hidráulica* do solo, calculada a partir da taxa de infiltração e apenas determinada na camada superficial, está dependente, considerando um grau de confiança de 95%, do teor de matéria orgânica ($r=0,692$) e da capacidade máxima para a água ($r=0,620$) e, indirectamente da quantidade de argila ($r=-0,656$). A relação entre a argila e a capacidade de infiltração de água já tinha sido referida por diversos autores (Cerdà, 1996; Ferreira, 1996; Casanellas & Reguerín, 2005; Nunes, 2007). Relativamente à afinidade entre a condutividade hidráulica e o teor de matéria orgânica, pode estar associado às melhores condições para o desenvolvimento de actividade biológica, que proporciona a criação de macroporos no solo que facilitam a passagem da água, evitando a matriz do solo (Costa, 1999). Por outro lado, a correlação da condutividade hidráulica com os valores de pF, pode estar relacionada com o efeito das forças que actuam no solo, nomeadamente as de capilaridade, na velocidade de infiltração de água (Costa, 1999).

A *humidade* do solo, por sua vez, está directamente relacionada com o pH ($r=0,809$ em água e $r=0,760$ em solução de KCl), capacidade de campo ($r=0,672$) e fracção de limo no solo ($r=0,597$) e, indirectamente com a repelência ($r=-0,585$). No entanto, estas inter-relações nem sempre se mantêm ao longo do perfil do solo. De facto, na camada de solo entre 5 e 7 cm apenas a relação com a repelência se mantêm, tendo mesmo sido ligeiramente acentuada ($r=-0,606$). Contudo, nesta camada subsuperficial, a humidade revela uma relação estatística com a matéria orgânica ($r=0,578$). Por outro lado, na camada de 15-17 cm, a humidade continua a ser estatisticamente relacionada com a matéria orgânica ($r=0,684$), com o limo ($r=0,608$) e o pH ($r=0,713$ em água e $r=0,796$ em solução de KCl), tal como tinha sido verificado na camada superficial do solo. No entanto, nesta camada mais profunda do solo, a humidade pode ser inversamente associada à fracção de areia fina ($r=-0,591$). Os resultados da variação entre os parâmetros que se correlacionam, ao longo do perfil, com a humidade, pode reflectir o efeito da temperatura do ar ambiente, na medida que o seu efeito na evapotranspiração do solo se faz sentir apenas na camada superficial do solo, devido ao baixo poder condutor do solo.

A relação entre o teor de humidade e o pH pode ser facilmente compreendida, uma vez que está directamente relacionada com a concentração das substâncias que fazem variar o pH. Por outro lado, a humidade do solo está associada à quantidade de água que fica retida nos microporos do solo, princípio no qual se baseia o conceito de capacidade de campo (traduz a humidade máxima do solo). Alguns autores tinham também já identificado uma relação entre o teor de humidade e a textura (Costa, 1999; Cerdà, 2000; Casanellas & Reguerín; 2005), matéria orgânica (Ferreira, 1996; Cerdà, 2000; Nunes, 2007) e hidrofobia (Ferreira, 1996, Ritsema, 1998; Doerr *et al.*, 2000; Nunes, 2007).

Contudo, a bibliografia indica ainda relações entre o teor de humidade do solo e a porosidade, traduzida indirectamente pela densidade aparente. A ausência de correlação com esta variável pode dever-se à análise de um número insuficiente de amostras. A ausência de correlação com esta variável pode ainda estar associada ao método analítico seleccionado, que considera apenas uma pequena quantidade de amostra, podendo os resultados não traduzir correctamente o efeito do conteúdo de pedras no solo. A condutividade hidráulica é negativamente correlacionada com a repelência à água, mas pode proporcionar a criação de fluxos preferenciais de água no solo.

A análise estatística também revelou diferentes inter-relações com a *capacidade máxima para a água* ao longo do perfil. Para além da relação com a condutividade hidráulica, acima referida, o pF 0 relaciona-se, na camada superficial do solo, com a capacidade de campo ($r=0,769$) e o teor de matéria orgânica ($0,609$) e, ainda, indirectamente com a densidade aparente ($r=-0,588$). Contudo, na camada intermédia analisada (5-7 cm), a relação apenas se mantém com a capacidade de campo ($r=0,737$). Este parâmetro volta, contudo, a ser correlacionado com os resultados da capacidade de campo na camada de solo entre 15-17 cm, e a matéria orgânica ($r=0,812$), bem como com a densidade aparente ($r=-0,556$), tal como tinha sido verificado na camada superficial. No entanto, nesta camada mais profunda, a capacidade máxima para a água, mostrou-se ainda inversamente relacionada com a fracção de argila ($r=-0,556$).

No que respeita à *capacidade de campo* do solo, para além da sua relação estatística com a capacidade máxima para a água e com a humidade na camada superficial do solo, anteriormente apresentadas, relaciona-se com o pH ($r=0,651$ em água e $r=0,562$ em solução de KCl) e a matéria orgânica ($0,703$) na camada superficial do solo. Na camada entre os 15 e 17 cm de profundidade, a capacidade de campo está directamente relacionada com a matéria orgânica ($r=0,754$) e indirectamente com a densidade aparente ($r=-0,688$), bem como com a capacidade máxima para a água ($r=0,948$), anteriormente referida.

De um modo geral, os resultados das relações da capacidade de retenção de água pelo solo (pF), associados ao efeito de capilaridade e da distribuição e dimensão dos poros, mostraram ser estatisticamente relacionados com a densidade aparente, matéria orgânica e fracção de argila, corroborando os resultados obtidos por outros autores (Costa, 1999; Ritsema, 1998; Magalhães, 2000; Emerson *et al.*, 2003).

Apesar da *hidrofobia* não ter revelado uma relação estatística com a condutividade hidráulica do solo, pode ser associada directamente ao teor de argila do solo ($r=0,603$) e, indirectamente ao pH ($r=-0,577$ em água e $r=-0,625$ em solução aquosa de KCl). As correlações entre estes parâmetros, para além de se manterem ao longo do perfil, revelam-se ligeiramente mais fortes em profundidade. Estes resultados parecem estar de acordo com os indicados por diversos autores, que referem o impacte da redução da área superficial a ser coberta pela camada hidrofóbica, resultante da formação de agregados por parte da argila (Ferreira, 1996; Ritsema, 1998; Doerr *et al.*, 2000). Estes autores, tal como

Buczko & Huttl (2006) apontaram ainda a presença de ácidos húmidos e fulvicos, associados à matéria orgânica, como responsáveis pela repelência do solo à água. A presença destes ácidos faz baixar o pH, o que se traduziu numa relação inversa com a hidrofobia. Devem contudo ser analisadas um maior número de amostras no sentido de confirmar a ausência de correlação estatística entre a hidrofobia e o teor de matéria orgânica.

As variações das inter-relações entre os vários parâmetros hidrológicos e as características físico-químicas do solo, ao longo do perfil, podem ser o reflexo da influência de diversos parâmetros biofísicos de cada local, nomeadamente do tipo e cobertura do uso do solo.

5.1.4 – Variações espaciais entre os pontos monitorizados

Tendo por base os diferentes parâmetros físico-químicos monitorizados, aplicou-se a análise estatística de clusters com o intuito de perceber se existem diferenças espaciais dentro da bacia da Ribeira dos Covões (Figura 34).

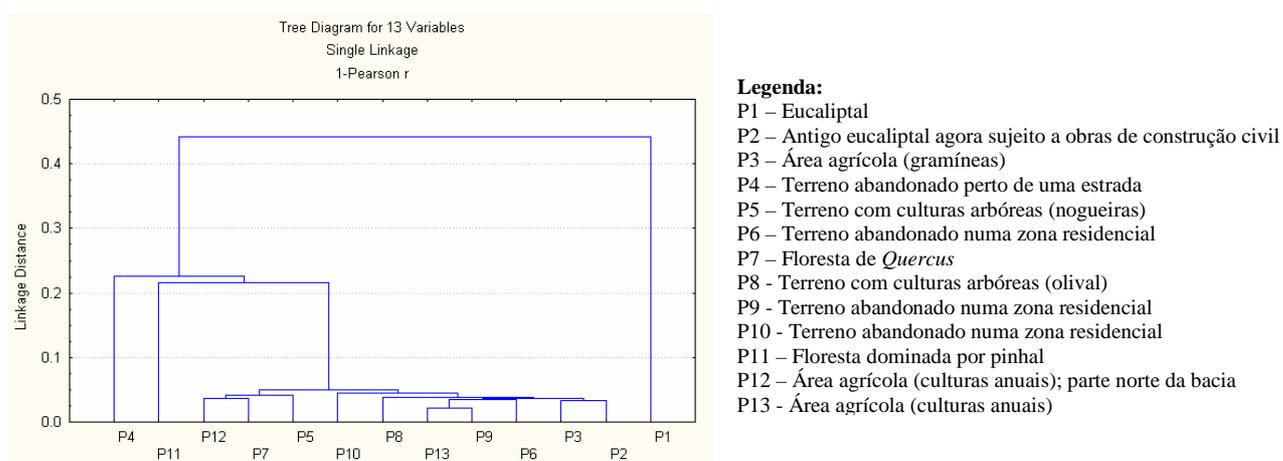


Figura 34 – Resultados da análise estatística de clusters aos diferentes locais monitorizados.

De um modo geral, podemos dizer que o local P1 (eucaliptal) apresenta características físico-químicas bastante distintas dos restantes locais estudados dentro da bacia. No entanto, apesar das características nos locais P4 (terreno abandonado) e P11 (pinhal) não serem tão distintas como em P1, estes também apresentam propriedades que os individualizam dos restantes. Por outro lado, os locais P9 (terreno abandonado) e P13 (área agrícola) são os que revelam um maior grau de proximidade.

Os resultados apresentados na Figura 34 também não parecem revelar nenhuma ligação entre as propriedades físico-químicas do solo e as unidades litológicas de cada local. De facto, P1, P2 e P10, todos eles localizados em unidades de depósitos superficiais, encontram-se agrupados de forma distinta; tal como acontece com P3, P4, P5 e P13 situados em depósitos aluvionares, e nos restantes locais estabelecidos em unidades calcárias.

Por outro lado, examinando os resultados obtidos com base no tipo de uso do solo, verifica-se que os locais com uso do solo florestal se agrupam de forma bem distinta, o que pode de alguma forma ser explicado pelas distintas características dos povoamentos florestais. No entanto, não parece ocorrer uma clara distinção entre os terrenos agrícolas e abandonados – restantes locais, com excepção de P2 (área em construção). Contudo, Nunes (2007) salienta a duração do período de abandono (desde a última intervenção) como um factor bastante importante para as alterações das propriedades físico-químicas do solo. De referir ainda que P6, P9 e P10, situados em áreas abandonadas em zonas residenciais, apresentam um certo nível de agrupamento. Contudo, o outro terreno abandonado (P4), situado nas imediações de uma estrada destaca-se num grupo à parte, o que pode estar associado à sua maior proximidade à linha de água. Refira-se ainda que relativamente a P2, apesar de ser uma antiga área florestal, submetida à intervenção de maquinaria pesada, apresenta características bastante semelhantes às das áreas agrícolas.

A proximidade às linhas de água também não parece traduzir-se directamente nas características físico-químicas dos solos, uma vez que todos os pontos localizados a alguns metros de distância do curso de água principal (P3, P4, P5 e P13) se agrupam de forma distinta.

Tendo em consideração as diferenças nas propriedades físico-químicas do solo, esperam-se comportamentos hidrológicos distintos em diferentes partes da bacia hidrográfica.

5.2 Influência da cobertura e uso do solo na geração de escoamento

5.2.1 Cobertura do solo

Com o objectivo de analisar o comportamento de diferentes coberturas do solo na geração de escoamento superficial, procedeu-se à instalação de parcelas fechadas, de acordo com o exposto do capítulo 3.2.2. No total foram instaladas 6 parcelas, com uma área aproximada de 0,15 m², para estudar 3 diferentes tipos de cobertura: cobertura total de gramíneas (área de jardim), cobertura total de material em decomposição (área de mata de carvalhos) e solo desprotegido (cerca de 85% pedras, 2% vegetação rasteira e 13% solo nu). As variações na altitude são escassas (± 60 m) e o declive é sensivelmente o mesmo ($\pm 20^\circ$) entre as várias parcelas. Reconhecendo que as parcelas se caracterizam por condições fisiográficas praticamente idênticas, considera-se que o coberto do solo é o principal factor de diferenciação.

A avaliação do nível de cobertura do solo foi realizada durante os vários períodos de monitorização das parcelas, levados a cabo em função dos eventos chuvosos registados. Apesar da monitorização ainda estar em curso, os dados apresentados apenas se reportam ao período entre Abril e Junho de 2008, uma vez que em Julho e Agosto praticamente não se registou precipitação. Assim, durante o curto espaço de tempo do ensaio não foram registadas alterações na cobertura do solo. No entanto, é necessário ter em consideração que a quantidade de precipitação que atinge as parcelas instaladas na mata não corresponde à quantidade de precipitação total, devido à intercepção promovida pela copa das árvores. Neste sentido, a precipitação interna da mata foi avaliada com recurso a dois pluviómetros instalados nas imediações das parcelas.

Na Tabela 9 apresentam-se as principais informações relativas à precipitação (registada entre cada monitorização) e escoamento superficial registadas ao longo do tempo.

Tabela 9 – Precipitação e escoamento superficial médio medido nas parcelas instaladas.

Volumes acumulados (mm)		14 Abril	30 Abril	1 Junho	20 Junho
Precipitação	Total	64,2	88,8	80,4	14,6
	Interna (na mata de carvalhos)	46,0	53,2	2,4	11,0
Escoamento	Cobertura de gramíneas	0	0	0	0
	Cobertura de material em decomposição	0	0	0	0
	Solo desprotegido	26	8	20	6

A análise dos resultados revela que o escoamento superficial foi nulo nas parcelas com solo totalmente coberto. Contudo, nas parcelas que delimitam o solo desprotegido, o escoamento superficial revelou valores que oscilaram entre 9,5% e 42,3%, relativamente à precipitação registada em igual período.

De acordo com Ceballos (1999), as variações registadas no escoamento das parcelas de solo desprotegido, estão associadas a outros factores que não apenas o total de precipitação, como sejam, por exemplo, a intensidade da precipitação e a sua distribuição no decurso do episódio (Figura 35) e a humidade antecedente do solo.

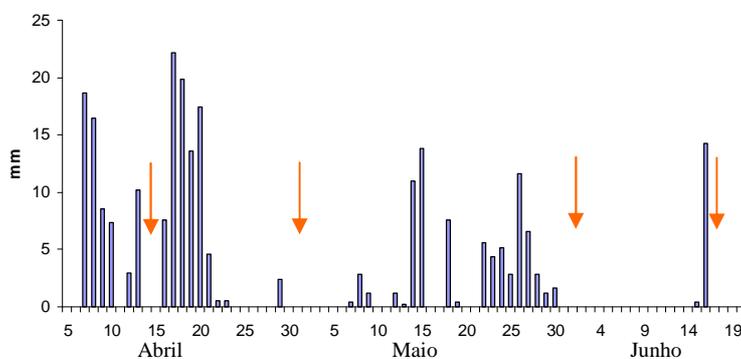


Figura 35 – Precipitação diária ao longo do ensaio e períodos de monitorização das parcelas.

De facto, a maior fracção de escoamento superficial (42,3%) nas parcelas de solo nu, foi gerada na última campanha de monitorização, em Junho, e resultou essencialmente de um evento de precipitação intensa, após um período de 14 dias sem chuva, o que teve certamente um efeito na redução do teor de humidade do solo. Estes resultados podem estar associados à geração de um fluxo hortoniano, na medida em que, alguns autores

referem que, sob condições de solo seco, a intensidade de precipitação pode rapidamente superar a capacidade de infiltração dos solos (Costa, 1999; Lencastre & Franco, 2006).

Contudo, a primeira monitorização (Abril), revelou também um elevado escoamento superficial (40,9%), que resultado de uma série de dias de precipitação. Neste caso, os resultados podem traduzir aquilo que alguns autores referem como fluxo superficial por saturação, segundo o qual o escoamento superficial ocorre quando o solo atinge a sua capacidade máxima de infiltração, chegando a um estado de saturação (Ferreira, 1996; Nunes, 2007).

No entanto, esta teoria não parece ser aplicável tendo em consideração os baixos coeficientes de escoamento superficial encontrado nas monitorizações seguintes (9,5 % no início de Maio e 25,0% no final de Maio). Contudo, nestes períodos de tempo, a água pode ter conseguido penetrar em camadas mais profundas do solo, por acção da gravidade, reduzindo o escoamento gerado no início de Maio. Costa (1999) refere que, devido à atracção das moléculas de água (coesão), as películas de água estabelecidas por adsorção podem sofrer considerável espessamento, preenchendo microporos de secção compatível com fenómenos de capilaridade, forrando espaços intersticiais maiores (macroporos) e constituindo anéis em torno de pontos de contacto entre partículas. O espessamento de películas em macroporos só pode porém dar-se até o limite a partir do qual o peso da película é suficiente para que, pelo menos parte da água, se desloque sob a influência da gravidade.

Após alguns dias sem chuva e com a diminuição provável do teor de humidade do solo, devido à acção directa da temperatura no solo desprotegido, o solo parece ter revelado uma certa capacidade para absorver a precipitação que surgiu de forma mais distribuída ao longo do mês de Maio, explicando assim o baixo coeficiente de escoamento gerado (25,0%).

Tendo em consideração a reduzida área das parcelas, não se pretende com este estudo obter valores de escoamento exactos e representativos dos cobertos de solo estudados, mas tão-somente ter uma noção das diferentes ordens de grandeza envolvidas. Além disso, pelo facto das parcelas se encontrarem fechadas, para delimitar com exactidão a área total que contribui para a produção de escoamento, ocorre uma interrupção no fluxo de água, que

não aconteceria num sistema aberto, pelo que os resultados também por este motivo não poderiam ser assumidos como verdadeiramente “representativos” da realidade (Ferreira *et al.* 2008).

A ausência de escoamento superficial verificada nas parcelas instaladas na área ajardinada e mata de carvalhos (de referir que a ausência de escorrência em parcelas de carvalho tinha já sido anteriormente documentada por Nunes (2007)), tendo em consideração os quantitativos de precipitação observados, está relacionada com a densidade de vegetação e favorece a infiltração. Outros factores que contribuem para esta maior capacidade de penetração de água poderão estar associados aos maiores teores de matéria orgânica na camada superficial e à presença de macroporosidade, que coadjuvam no transporte de água em profundidade. Por outro lado, acrescem os efeitos do processo de intercepção da chuva por parte do coberto vegetal, cuja consequência mais importante, é a perda de recursos hídricos devido ao armazenamento de água na vegetação, a qual regressa à atmosfera por evaporação. (Lencastre & Franco, 2006).

Segundo Xiao & McPhearson (2003), a capacidade de intercepção da precipitação pelas florestas é influenciada, nomeadamente, pela estrutura da floresta (ou seja, espécies, dimensões e capacidade de armazenamento), arquitectura da árvore (por exemplo, período foliar, área superficial das folhas e troncos, fracção de brechas, capacidade de armazenamento na superfície). Deste modo, referem-se as variações de intercepção promovidas pela mata onde se instalaram as parcelas, claramente observáveis na Tabela 9, anteriormente apresentada. De salientar, ainda, a influência que a queda de folhada pode desempenhar na quantidade de precipitação interceptada pela copa das árvores, visto que estamos perante uma floresta com espécies de folha caduca. No entanto, com excepção do mês de Maio, a variação da razão entre a precipitação interna e a precipitação total ao longo do tempo não foi muito acentuada (71,6%, 59,9%, 3,0%, 75,4%, sucessivamente para os períodos monitorizados).

Por outro lado, as variações na fracção de precipitação interna registada na floresta podem ser relacionadas com o regime pluviométrico. Autores como Xiao & McPhearson (2003) e David *et al.* (2007), salientam a importância dos factores meteorológicos, tais como a quantidade, duração, intensidade e frequência dos eventos chuvosos, na capacidade de intercepção da precipitação pela vegetação (por exemplo, quanto menor a intensidade da

chuva, maior a percentagem interceptada). De facto, a menor relação entre a precipitação interna e a precipitação total foi registada no final de Maio, após um longo período de chuvas. Por outro lado, após alguns dias sem chuva, com capacidade para evapotranspiração da precipitação interceptada, em Junho, a vegetação “regenerou” a sua capacidade de armazenamento de mais precipitação, justificando assim o elevado coeficiente de intercepção.

Estes resultados revelam assim o importante papel que a quantidade de precipitação interceptada pela vegetação pode desempenhar no balanço hídrico e consequentemente nos recursos hídricos. De facto, do ponto de vista hidrológico, a vegetação exerce um controlo significativo na evaporação e redistribuição da precipitação incidente, influenciando a complexidade das inter-relações precipitação-escoamento (Lhorens & Domingo, 2006). Valente & Gash (1997) referem ainda que a presença de bosques e florestas favorece a infiltração e reduz a velocidade de escoamento superficial, contribuindo para a redução dos fenómenos de erosão e de ocorrência de grandes cheias, bem como para o aumento das reservas hídricas subterrâneas, uma vez que elimina o choque directo das gotas com o solo e modifica as características do solo.

5.2.2 Uso do solo

Neste subcapítulo pretende-se analisar e quantificar as variações nos processos da água, em especial sobre a relação escoamento superficial *versus* infiltração em locais com diferentes intervenções humanas. Assim procura-se estudar as diferenças entre um solo florestal (F) e um solo onde as árvores foram cortadas (deixando os resíduos orgânicos à superfície do solo - DF), um solo agrícola lavrado (AL) e um solo agrícola abandonado (AA), bem como entre um solo completamente “limpo” através da intervenção humana para a construção de estradas (OE) e para a instalação de rede de saneamento (OS). Procura-se ainda perceber os diferentes impactes destas interacções do homem com o meio ambiente nos processos hidrológicos, tendo em consideração o conhecimento da cobertura do solo, humidade e grau de repelência à água. Por outro lado, procura-se ainda perceber as implicações em termos de erosão, através da quantidade de sedimentos erodidos e do seu conteúdo orgânico, tendo em consideração o teor de matéria orgânica presente no solo.

Descrição das parcelas de estudo

As diferentes situações que se pretendem estudar (área florestal e desflorestada, terreno agrícola lavrado e abandonado, bem como intervenções mecânicas para a realização de obras), estão associados a diferentes coberturas do solo muito diversificadas. Assim, na Figura 36 apresenta-se um exemplo fotográfico dos diferentes casos, aquando das simulações de chuva, realizadas entre os dias 15 e 19 de Setembro de 2008. Na Figura 37 apresentam-se os valores médios dos diferentes tipos de coberto, identificados visualmente.



Figura 36 – Fotografias das parcelas instaladas para o estudo para os diferentes casos de estudo – Setembro de 2008 (F: floresta, DF: desflorestação, AL: terreno agrícola lavrado, AA: terreno agrícola abandonado, OE: obras para construção de estrada e, OS: obras para instalação de saneamento básico).

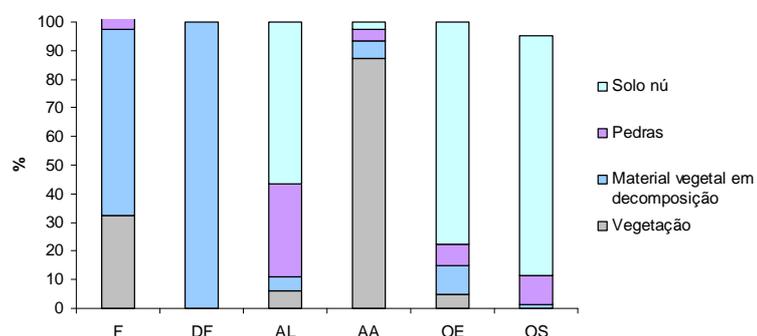


Figura 37 – Valores médios de cobertura do solo nos diferentes os diferentes casos de estudo (F: floresta, DF: desflorestação, AL: terreno agrícola lavrado, AA: terreno agrícola abandonado, OE: obras para construção de estrada e, OS: obras para instalação de saneamento básico).

A desigualdade na cobertura das parcelas dos diferentes casos em estudo é notória. Verifica-se que na área florestal a cobertura com material vegetal em decomposição, constituído essencialmente por agulhas de pinheiro, folhas de eucalipto e pequenas braças de árvore, é bastante significativa (65%). A percentagem de coberto vegetal nesta área é também relevante (32,5%), sendo de referir que apenas se considera a cobertura vegetal promovida por herbáceas e arbustos. A cobertura promovida pela copa das árvores não é tomada em consideração, uma vez que não interfere nos ensaios de simulação de chuva.

Relativamente à área desflorestada, observa-se uma total cobertura do solo com material vegetal em decomposição, essencialmente constituído por pequenas braças e cascas de árvore.

O terreno agrícola abandonado apresenta também uma cobertura com vegetação bastante significativa (87,5%), essencialmente constituída por herbáceas que atingem, em alguns casos, os 70 cm de altura. Por outro lado, a área agrícola lavrada, apresenta uma superfície maioritariamente desprotegida (56,5% de solo nú), onde a cobertura com pedras desempenha um papel relevante na cobertura do solo (32,5%).

Também as áreas sujeitas a intervenção de maquinaria para a realização de obras revelam um solo largamente desprotegido, onde é notória a presença de crosta superficial e a existência de fendas, promovidas pela dissecação do solo, especialmente na área sujeita a obras para a instalação de saneamento (OS).

Uma vez que a cobertura do solo e o tipo de uso influenciam os teores de matéria orgânica à superfície do solo (Ferreira, 1996; Nunes, 2007), foi efectuada a sua determinação nas camadas entre 0-2 cm e 2-5 cm, cujos resultados se apresentam na Figura 38.

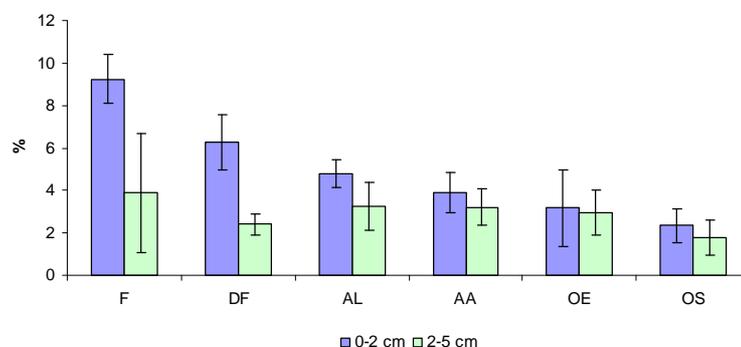


Figura 38 – Valores médios (%) e desvio padrão do teor de matéria orgânica, a diferentes profundidades (0-2 cm e 2-5 cm), nos diferentes casos de estudo (F: floresta, DF: desflorestação, AL: terreno agrícola lavra, AA: terreno agrícola abandonado, OE: obras para construção de estrada e, OS: obras para instalação de saneamento básico).

A maior concentração de matéria orgânica está presente nos solos com uso florestal (F e DF), sendo também nestes que a diminuição do teor médio de matéria orgânica é mais acentuado em profundidade. A acção do homem na floresta, através da desflorestação, parece ter promovido um impacto negativo em termos de concentração de matéria orgânica no solo, apesar da camada de material vegetal que ainda cobre a superfície. Os valores de

matéria orgânica encontrados na floresta, essencialmente constituída por eucaliptal e pinheiros jovens, rondam os 9% e 4% nas camadas entre 0-2 cm e 2-5 cm, respectivamente. Contudo, estes valores encontram-se bastante abaixo dos registados por Ferreira (1996) nos 10 cm superficiais do solo, quer para povoamentos de *Pinus pinaster* (15,8%) quer de *Eucalyptus globulus* (18,2%), instalados na zona centro de Portugal.

Na área onde foram abatidas as árvores, a matéria orgânica constitui 6% e 2% do peso total da amostra, à superfície e subsuperfície, respectivamente. De salientar ainda que o teor de matéria orgânica na camada dos 2-5 cm entre os solos com uso agrícola e florestal não é muito variável. Comparando os solos das áreas agrícolas lavradas (AL) e abandonadas (AA), verifica-se que a área abandonada, com cobertura vegetal, apresenta um teor de matéria orgânica (3,9%) ligeiramente inferior ao da área lavrada (4,8).

Por outro lado, os solos com intervenção de maquinaria não apresentam um decréscimo significativo de matéria orgânica relativamente às áreas com uso do solo agrícola ou florestal. No caso dos valores registados no local de obras para a estrada (OE) registou-se um valor médio de cerca de 3%, apenas com uma ligeira variação ao longo dos 5 cm superficiais. Estes valores podem estar relacionados com o facto destas serem áreas florestais cortadas e cuja camada superficial do solo foi removida recentemente (à menos de um ano). Visto que a área onde se instalou o saneamento básico (OS) foi intervencionada à mais tempo (mais de um ano), os teores de matéria orgânica são mais baixos (cerca de 2%), podendo ser o resultado de processos de lixiviação, sem incorporação de nova biomassa. Estes ensaios OS foram realizados em locais que apresentaram, no passado, um uso do solo florestal.

Os resultados relativos ao teor de humidade do solo são apresentados na Figura 39.

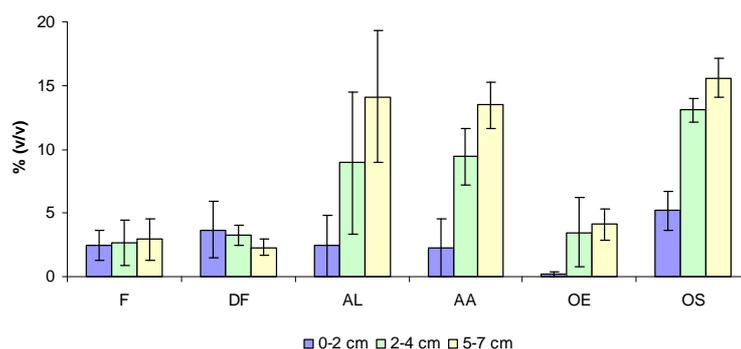


Figura 39 – Valores médios (% v/v) e desvio padrão do teor de humidade do solo, a diferentes profundidades (0-2 cm, 2-4 cm e 5-7 cm), nos diferentes casos de estudo (F: floresta, DF: desflorestação, AL: terreno agrícola lavra, AA: terreno agrícola abandonado, OE: obras para construção de estrada e, OS: obras para instalação de saneamento básico).

De acordo com os resultados observados na Figura 39, constata-se que o teor de humidade é bastante variável, especialmente em profundidade, com excepção da área florestal e desflorestada. De salientar que, os valores obtidos podem reflectir os episódios chuvosos ocorridos na semana anterior à realização das experiências de simulação de chuva.

Os teores de humidade entre a área florestal e desflorestada são sensivelmente os mesmos, o que pode estar associado, em ambos os casos, ao elevado nível de cobertura do solo com material vegetal e vegetação (no caso da área florestal). Nas áreas agrícolas, o teor de humidade na camada superficial é semelhante ao da área florestal, verificando-se, contudo, grandes diferenças nos valores registados em profundidade (valores médios de cerca de 14% no uso do solo agrícola e, entre 2 a 3% no uso do solo florestal). Estes efeitos em termos de humidade podem estar não só associados à menor cobertura dos terrenos agrícolas, como também à ausência de repelência do solo à água, o que possibilita a infiltração de água para camadas mais profundas do solo (Figura 40). De facto, os elevados valores de hidrofobia registados no solo florestal contrastam com a hidrofília dos solos agrícolas.

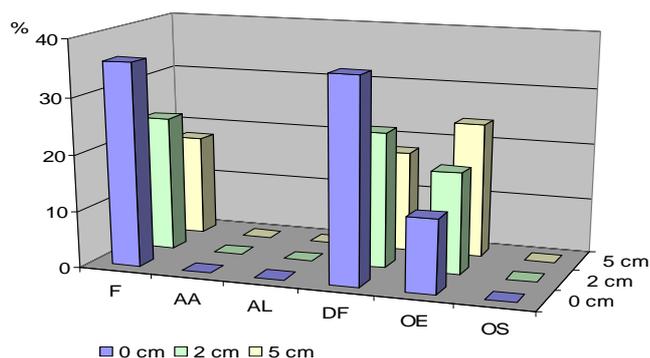


Figura 40 – Valores médios de hidrofobia a diferentes profundidades (0-2 cm, 2-4 cm e 5-7 cm), nos diferentes casos de estudo (F: floresta, DF: desflorestação, AL: terreno agrícola lavra, AA: terreno agrícola abandonado, OE: obras para construção de estrada e, OS: obras para instalação de saneamento básico).

O fenómeno de hidrofobia dos solos pode ainda justificar os mais baixos teores de humidade do solo na área onde se procede à construção de uma estrada (OE), anterior área florestal, comparativamente com a área onde se realizaram obras para instalação de saneamento básico (OS). Associado à diminuição da repelência em profundidade na área OE (fortemente hidrofóbico à superfície e severamente hidrofóbico nas camadas subsuperficiais), verifica-se um incremento do teor de humidade. Segundo Witter *et al.* (1991), a hidrofobia do solo é considerada mais severa em solos secos e diminui com o aumento do conteúdo de humidade, até um valor crítico em que o solo se torna hidrófilo.

Considerando apenas as áreas com solos hidrófilos, constata-se que a área de instalação do saneamento (OS), apesar de estar associado a um solo mais compactado, como resultado da passagem de maquinaria pesada, apresenta maiores valores de humidade, relativamente aos solos agrícolas. Este facto pode estar associado às diferentes texturas do solo. O ensaio OS situa-se nas imediações do local P11, referido no subcapítulo 5.2.1, que apresenta uma textura franco argilo-limosa à superfície e, argilosa entre os 5 e 17 cm. Por outro lado, os ensaios AA e AL foram realizados próximo do local P8, com uma textura arenosa entre os 0 e 2 cm e franco arenosa até aos 17 cm. No que respeita aos ensaios na área florestal (F) e desflorestal (DF), a sua realização ocorreu nas imediações do local P1, apresentando a mesma textura: argilo-limosa na camada superficial (0-2 cm) e argilo-arenosa entre o 2 e os 5 e 17 cm de profundidade. Costa (1999) refere a influência da textura sobre as condições de humidade e arejamento do solo.

Relativamente à hidrofobia dos solos florestais (F e DF), a presença de uma espessa camada de manta morta à superfície da camada mineral, a que se associam teores de matéria orgânica relativamente mais elevados, pode ter promovido a formação de uma repelência à água bastante vincada, que se traduz na classificação de extremamente hidrofóbico na camada superficial e de severamente hidrofóbico nas camadas subsuperficiais (2 e 5 cm). Actualmente é aceite que causas comuns de repelência à água são a presença de compostos orgânicos, derivados de plantas vivas ou em decomposição ou microorganismos, nomeadamente plantas superiores, bactérias, fungos e algas (Imerson *et al.*, 1992; Ritsema, 1996; Doerr *et al.*, 2000).

Na Figura 41 representam-se ainda os resultados da resistência mecânica do solo no que respeita à torção e penetração, parâmetros importantes em termos de erodibilidade do solo (Prats, 2007).

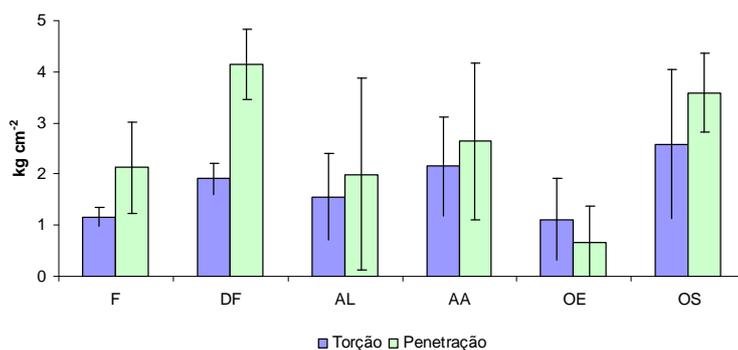


Figura 41 – Valores médios (kg cm^{-2}) e desvio padrão da resistência do solo à torção e penetração, nos diferentes casos de estudo (F: floresta, DF: desflorestação, AL: terreno agrícola lavra, AA: terreno agrícola abandonado, OE: obras para construção de estrada e, OS: obras para instalação de saneamento básico).

De um modo geral verifica-se que os valores de resistência à penetração são superiores aos da torção, com excepção do local sujeito a obras de construção de estrada (OE), que se apresentava seco e com algum encrostamento superficial. Segundo Porta *et al.* (1994), a resistência mecânica dum solo à deformação e à acção de forças mecânicas depende do seu conteúdo em humidade. Contudo, os valores obtidos não parecem seguir esta tendência. A resistência do solo em áreas florestais é referida por Nunes (2007) como um dos usos do solo com maior resistência à penetração, o que pode reflectir os valores obtidos na área desflorestada (DF). Por outro lado, Prats (2007) sugere o encrostamento superficial como

um factor de grande importância, o que parece explicar os elevados resultados de resistência mecânica obtidos no local de realização de obras para saneamento (OS).

Processos hidrológicos

A resposta hidrológica dos solos sujeitos a um mesmo quantitativo de precipitação (43 ± 3 mm h^{-1}), através da aplicação de técnicas de simulações de chuva, demonstra variações na quantidade de escoamento superficial ao longo do tempo e entre os vários casos de estudo (Figura 42).

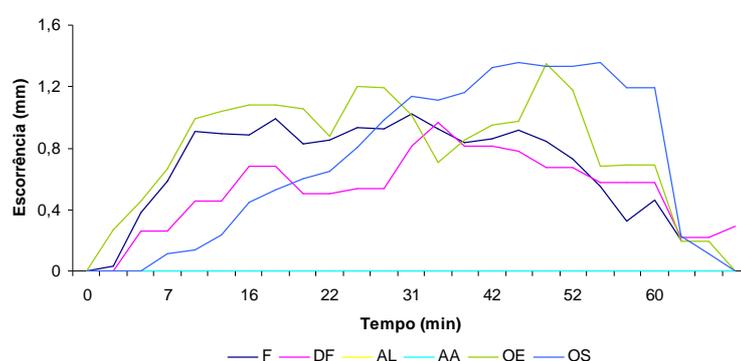


Figura 42 – Valores médios de escoância obtidos nos vários ensaios (F: floresta, DF: desflorestação, AL: terreno agrícola lavra, AA: terreno agrícola abandonado, OE: obras para construção de estrada e, OS: obras para instalação de saneamento básico).

A partir da Figura 42 salienta-se a ausência de escoamento superficial nas áreas agrícolas (AL e AA), apesar de Nunes (2007) ter encontrado valores médios de escoamento superficial de 33% relativamente à precipitação, em parcelas em pousio ou em abandono recente.

Verifica-se ainda que, apesar das variações registadas nos diferentes ensaios, ocorre sempre uma fase inicial de crescimento da quantidade de escoamento, com início em diferentes momentos para os diferentes ensaios. Parece haver depois um período de estabilização, apesar das flutuações observadas, antes de ocorrer um decréscimo das quantidades de escoamento na fase final dos ensaios, que se iniciam, por vezes, antes da cessação da precipitação (minuto 60). No entanto, nos ensaios realizados na área onde se procederam a obras para instalação de saneamento (OS), observa-se sempre um aumento do escoamento ao longo de todo o ensaio, apenas com uma acentuada diminuição da quantidade de escoamento após o término da precipitação.

De um modo geral, os locais onde se realizaram obras foram os que proporcionaram o desenvolvimento de volumes de escoamento mais elevados, apesar da geração de escoamento se iniciar em distintos períodos de tempo. As simulações realizadas na área com obras para a construção de uma estrada (OE) foram as que promoveram o aparecimento de escoamento mais rapidamente, e de um volume inicial maior, o que pode ser o reflexo do grau de compactação do solo. Nestes ensaios, após os 20 minutos iniciais da simulação de chuva, observaram-se grandes variações em termos de geração de escoamento, o que pode estar associado ao nível de hidrofobia e à criação de fluxos preferenciais de água durante os ensaios. Por outro lado, o local submetido a obras para a instalação de saneamento básico (OS) revelou uma maior capacidade de infiltração, apesar da compactação e da existência de crosta. Nunes (2007) refere que o encrostamento, ou selamento superficial do solo, afecta as propriedades hídricas do solo, uma vez que reduzem claramente a infiltração e aumentam, consequentemente, o escoamento superficial. No entanto, as áreas OS onde se realizaram os ensaios, apresentam uma densa rede de fendas e gretas, promovidas pela secura do solo, o que parece ter influenciado a criação de fluxos preferenciais de água, explicando assim a maior capacidade de infiltração de água inicial.

De acordo com Figueiredo (2001), o efeito da crosta apresenta um comportamento ambivalente em termos de infiltração de água. Quando existem elementos grosseiros aflorantes, a precipitação actua sobre toda a superfície descoberta e a crosta sela o perímetro superficial de contacto entre elementos grosseiros e terra fina, reduzindo a infiltração preferencial nessa zona. Pelo contrário, quando os elementos grosseiros repousam à superfície, não apenas a fracção de solo que lhes está subjacente fica protegida do impacto directo da chuva, como também actua como zona preferencial de infiltração associada ao desenvolvimento de crosta na restante área.

No intuito de tentar compreender melhor o que aconteceu no decurso dos ensaios, apresentam-se na Figura 43 os hidrogramas, que mostram os resultados da quantidade de escoamento acumulado e do teor de humidade ao longo do tempo.

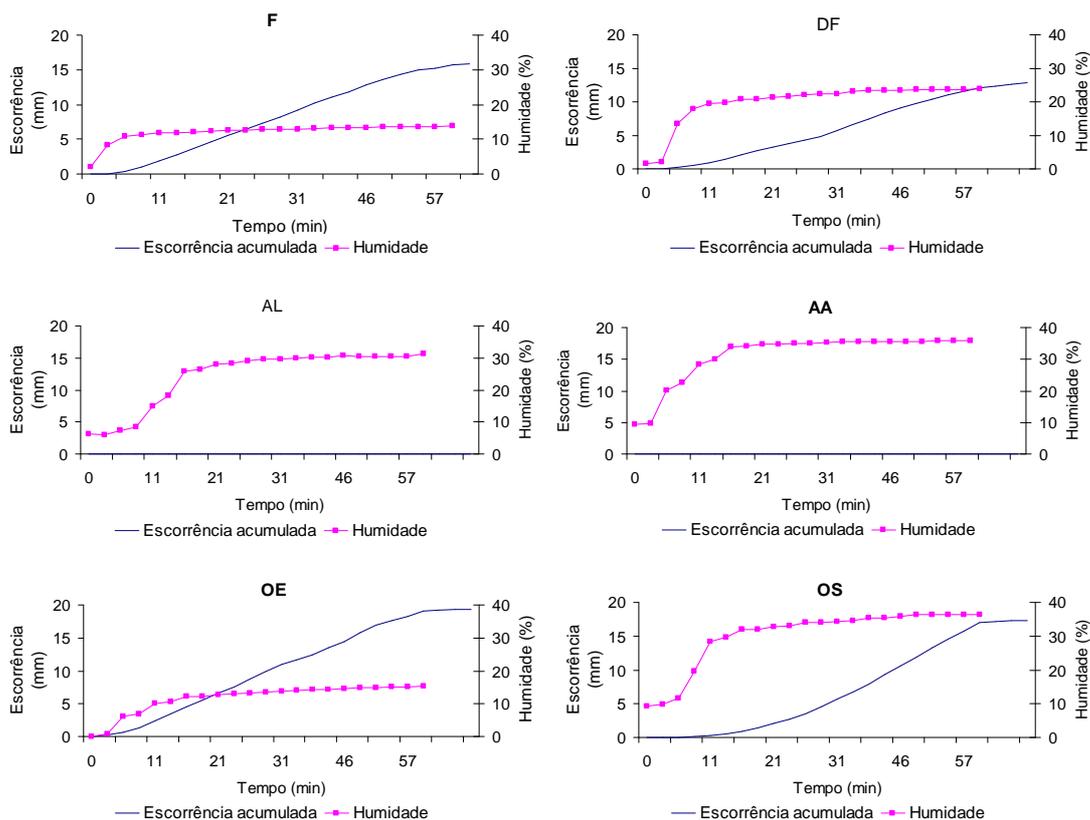


Figura 43 – Hidrogramas dos diferentes casos de estudo (valores médios) (F: floresta, DF: desflorestação, AL: terreno agrícola lavra, AA: terreno agrícola abandonado, OE: obras para construção de estrada e, OS: obras para instalação de saneamento básico).

Na Tabela 10 apresentam-se de forma sumária todos os dados obtidos durante a realização das simulações de chuva.

Tabela 10 – Sumário dos resultados obtidos nas simulações de chuva.

	Precipitação acumulada (mm)	Tempo de início do escoamento (min)	Escoamento		Infiltração		Tempo de término do escoamento (min)	Humidade 0-3,5 cm (% v/v)	
			(mm)	(%)	(mm)	(%)		Início	Fim
F	43	4	15,9	37,0	27,1	63,0	63,5	2,0	13,9
DF		10	12,9	30,0	30,1	70,0	71,5	1,6	24,0
AL		0	0	0	43	100,0	0	6,2	31,2
AA		0	0	0	43	100,0	0	9,4	35,8
OE		3	19,4	45,1	23,6	54,9	63	0	15,3
OS		8,5	17,3	40,2	25,7	59,8	64,5	9,3	36,4

F: floresta, DF: desflorestação, AL: terreno agrícola lavra, AA: terreno agrícola abandonado, OE: obras para construção de estrada e, OS: obras para instalação de saneamento básico

De um modo geral, observa-se que em nenhum dos casos a geração de escoamento excedeu os 50% da precipitação e, que os valores de humidade do solo atingiram a saturação durante os primeiros 20 minutos após o início do ensaio. Os resultados revelam ainda uma maior geração de escoamento superficial após a saturação do solo, tal como indicado por Coelho *et al.* (2005).

O teor de humidade do solo aumenta lentamente no início do ensaio, com excepção da área florestal (F), seguido por um crescimento mais acentuado, após o qual parece ocorrer uma estabilização. Esta estabilização surge mais rapidamente nos solos florestais (após cerca de 8 minutos do início da precipitação), seguida dos locais com obras (após 12 minutos) e, por fim, dos solos agrícolas (por volta dos 18 minutos). O rápido aparecimento de escoamento superficial na área florestal (F) e no local de construção de obras de estrada (OE), expressam a aptidão do solo para gerar escoamentos rápidos.

A relação entre a hidrofobia e a quantidade de escoamento e o início da sua geração não é clara, tendo em consideração os diferentes momentos em que se registou o aparecimento de escoamento nos ensaios F e DF, bem como as diferenças entre os locais com obras (OE hidrofóbico e OS hidrofílico). Coelho *et al.* (2005) referem também que a repelência do solo à água não induz um significativo impacto na geração de escoamento.

Salienta-se ainda que a estabilização da taxa de infiltração (Figura 43), nomeadamente nos ensaios realizados em áreas agrícolas (AA e AL), não é acompanhada de escoamento superficial. Estes resultados parecem revelar que a infiltração ocorre a maior profundidade, associada à ausência de hidrofobia do solo. Estes foram também dos locais que maiores teores de humidade registaram no final do ensaio (35,8% para AA e 31,2% para AL), para além do local de obras para instalação de saneamento (36,4%).

Os resultados obtidos nas áreas lavradas, contrariam as observações de Nunes (2007), que refere que a lavra do solo reduz substancialmente a sua capacidade de infiltração, favorecendo a mineralização da matéria orgânica e promovendo a exposição do solo mineral ao impacto das gotas da chuva, o que contribui para a destruição dos agregados e formação de crostas superficiais. No entanto, Coelho *et al.* (2004) indicam valores de escoamento superficial de cerca de 5% em áreas lavradas, segundo as curvas de nível, tal como ocorre nas áreas em estudo.

As áreas florestal (F) que abrange a presença de eucaliptos e pinheiros jovens, de árvores cortadas (DF) e de obras para construção de uma estrada (OE), revelaram solos bastante secos antes do início do ensaio (inferiores a 2%) e, bastante semelhantes, o que pode estar associado à sua grande proximidade geográfica. De acordo com Costa (1999), num solo relativamente seco, a taxa de infiltração é, geralmente, mais elevada do que em solos mais húmidos, devido ao elevado gradiente de tensão, tal como verificado ao longo dos ensaios realizados. Com efeito, excepto nos espaços suficientemente grandes onde não se forma lâmina líquida, o solo não saturado oferece mais resistência que o solo saturado.

As fracções de precipitação infiltrada no solo das áreas florestais – F (63%), são bastante superiores aos valores indicados por Nunes (2007) registados em parcelas de pinhal adulto (10% de escoamento). No entanto, coincidem com valores encontrados pela mesma autora, em parcelas com plantação de pinhal jovem (63%). Estão ainda dentro da gama de valores regista por Coelho *et al.* (2005) em áreas de eucalipto (8-43% da precipitação).

Segundo David *et al* (2007), os valores da infiltração de água em solos florestais são usualmente atribuídos à acção conjugada de diversos factores, nomeadamente ao teor de matéria orgânica do solo, à presença de numerosas raízes e vestígios de animais que criam canalículos por onde a água se infiltra com facilidade. Deste modo, o desenvolvimento de fluxos preferenciais de água no solo, atendo ao elevado grau de repelência dos solos em F e DF (extremamente hidrofóbico à superfície e severamente hidrofóbico nas camadas subsuperficiais), pode ajudar a compreender a capacidade de infiltração demonstrada nos ensaios (63% na área florestada e 70% na área desflorestada).

Os locais de realização de obras apresentaram as mais elevadas fracções de escoamento superficial (45,1% em OE e 40,2% em OS), o que pode também estar associado à reduzida cobertura do solo, e grande percentagem de solo descoberto, comparativamente com os locais onde se realizaram os outros ensaios. De referir que os maiores valores de escoamento superficial obtidos na área OE, relativamente à área OS, podem também dever-se ao maior declive do terreno: praticamente nulo em OE, enquanto OS apresenta cerca de 23°. Declives mais acentuados proporcionam um menor tempo de contacto entre o solo e a precipitação, importante para o processo de infiltração (Cerdà, 1996; Ceballos, 1999).

Apesar da estimativa da quantidade de precipitação infiltrada não ter tido em consideração o efeito de intercepção da vegetação, alguns autores consideram a sua importância em termos de hidrologia dos solos. A parte aérea das plantas é responsável pela intercepção da precipitação, promovendo a evaporação e a absorção de parte da água ao nível da folhagem, e pela partição da água da chuva que atinge o solo. Segundo David *et al.* (2007), os valores de intercepção mais comuns variam entre 2 e 5 mm de precipitação.

A rugosidade da superfície do solo também desempenha um papel importante nos processos hidrológicos, determinando o volume de água que pode ser retido como armazenamento superficial (Figueiredo, 2001; Prats, 2007).

5.2.3 - Erosão

Associado aos processos hidrológicos verifica-se muitas vezes a susceptibilidade dos solos à erosão. Assim, no sentido de perceber a relação entre as diferentes respostas hidrológicas e a quantidade de material erodido nas áreas com diferentes intervenções humanas, quantificaram-se e analisaram-se os sedimentos arrastados com o escoamento superficial durante os ensaios de simulação de chuva (Figura 44).

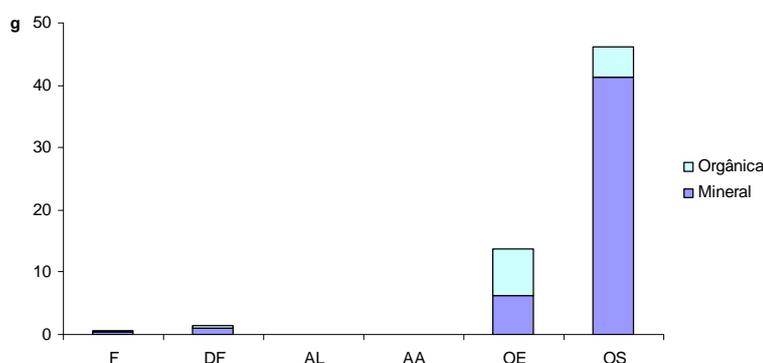


Figura 44 – Valores médios das frações mineral e orgânica dos sedimentos arrastados no escoamento superficial (F: floresta, DF: desflorestação, AL: terreno agrícola lavra, AA: terreno agrícola abandonado, OE: obras para construção de estrada e, OS: obras para instalação de saneamento básico).

As áreas de solo descoberto, onde se procedeu à intervenção de maquinaria pesada, são as que apresentam maiores valores de sedimentos arrastados com o escoamento superficial. Os resultados revelam valor médio de 46,1 g ($307,4 \text{ g h}^{-1} \text{ m}^{-2}$) na área intervencionada para instalação de saneamento (OS) e, de 13,8 g ($91,8 \text{ g h}^{-1} \text{ m}^{-2}$) na área de construção de

estrada (OE). Cerdà (2001) também considera que os taludes de obras civis contribuem com um importante volume de sedimentos.

Relativamente às diferenças obtidas nas áreas de realização obras, a quantidade de sedimentos recolhidos no local de obras para construção de uma estrada (OE), pode estar associado ao menor grau de resistência mecânica do solo, tal como referido por Coelho *et al.* (2004). Por outro lado, as grandes quantidades de material erodido no local de instalação de saneamento (OS), tendo em consideração a resistência do solo, pode reflectir o efeito do acentuado declive (23° em OS e 1° em OE), visto que o escoamento superficial pode atingir uma maior velocidade e, conseqüentemente, maior energia para o arraste de partículas.

As áreas agrícolas não apresentam sedimentos, uma vez que também não se promoveu a geração de escoamento superficial. No que respeita ao uso do solo florestal, a área florestada (F) proporcionou uma menor quantidade de sedimentos ($4,6 \text{ g h}^{-1} \text{ m}^{-2}$), relativamente à área onde se procedeu ao abate e remoção de árvores ($9,8 \text{ g h}^{-1} \text{ m}^{-2}$), o que pode estar associado à perturbação promovida aquando do corte. As taxas de erosão obtidas para a área florestal (F) estão abaixo dos $7,6 - 26,8 \text{ g h}^{-1} \text{ m}^{-2}$, registados por Coelho *et al.* (2005).

A quantidade de material vegetal deixado na superfície do solo, na área desflorestada, promove a protecção do solo contra a acção erosiva das gotas de chuva. A vegetação, especialmente arbustiva e herbácea, bem como a manta morta, presentes na área florestal (F), contribuem eficazmente para a dissipação da energia cinética das gotas da chuva ou da precipitação interna, constituindo um factor fundamental de defesa e conservação do solo. Para além de o proteger da acção directa da chuva, o raizame forma uma rede de retenção de partículas do solo. Segundo Saraiva *et al.* (1988), a presença de vegetação retarda a velocidade de escoamento da água, reduzindo a força de arrastamento. Apesar dos ensaios realizados não revelarem um retardamento na geração de escoamento superficial nas áreas florestais (F), o efeito de protecção da vegetação está patente na quantidade de sedimentos recolhidos, comparativamente aos analisados na área desflorestada (DF).

A análise dos sedimentos recolhidos revelou ainda que, na maioria dos casos, a fracção mineral é predominante (Figura 44), com excepção dos resultados obtidos em OE (6,2% de fracção mineral e 7,2% orgânica).

Em termos de material orgânico erodido, o estudo realizado no local de construção da estrada (OE) apresenta uma elevada concentração da fracção orgânica nos sedimentos (valor médio de 1110 mg L⁻¹), seguido do local de instalação do saneamento (631 1110 mg L⁻¹). Associado à menor quantidade de sedimentos recolhidos, a área desflorestada apresenta uma concentração de matéria orgânica de 71 mg L⁻¹, superior aos valores obtidos na área arborizada (36 mg L⁻¹). O teor de matéria orgânica nos sedimentos não apresenta qualquer relação estatística com os valores encontrados nos solos.

5.3 Resposta hidrológica da bacia

Este sub-capítulo procura estudar a relação entre a precipitação e a geração de escoamento superficial na bacia hidrográfica da ribeira dos Covões. A aplicação de modelos simplificados de precipitação – escoamento é geralmente utilizada para representar os processos hidrológicos em bacias com escassos dados hidrometeorológicos. Mesmo em bacias com bons sistemas de monitorização, este modelo é bastante aplicado tendo em consideração a complexidade dos processos hidrológicos, que tornam difícil a quantificação com precisão de todos os parâmetros (precipitação, evaporação, infiltração e escoamento).

5.3.1 Precipitação

Tal como anteriormente referido, a precipitação que não é interceptada pela vegetação ou pelos edifícios atinge a superfície terrestre, de onde é evaporada, infiltrada ou permanece retida em depressões. Quando a precipitação é maior do que as capacidades relativas dos processos anteriormente referidos, o volume de água excedente, de acordo com as leis da gravidade, escoar-se à superfície do terreno até à linha de água mais próxima, dando origem ao escoamento superficial (Lencastre & Franco, 2006).

Tendo em consideração o importante papel da precipitação como elo de ligação entre os fenómenos meteorológicos propriamente ditos e os do escoamento superficial, procedeu-se a análise dos seus quantitativos desde 2005, ano em que começaram os registos do caudal escoado na ribeira dos Covões, principal curso de água na área em estudo. As variações mensais e anuais da precipitação registada desde o ano 2005, são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Variação mensal e anual da precipitação e do número de dias com precipitação entre 2005 e Outubro de 2008.

	2005		2006		2007		2008	
	Precipitação média (mm)	Nº dias	Precipitação média (mm)	Nº dias	Precipitação média (mm)	Nº dias	Precipitação média (mm)	Nº dias
Janeiro	3,6	5	28,6	17	28,2	15	105,4	17
Fevereiro	25	4	97	12	134	19	37,4	16
Março	60,8	13	132,8	15	54,6	8	32,8	15
Abril	59,4	12	69,8	11	43,6	12	132,4	19
Maiο	24,4	7	9	5	84	13	71,4	19
Junho	2,6	1	32,8	3	70,2	8	13,4	3
Julho	4,8	0	1,4	1	27,8	5	3	6
Agosto	1,8	0	36	3	12,6	5	6	5
Setembro	29,2	5	103,5	9	0,4	1	43	10
Outubro	134,8	15	294,4	16	2,4	7	-	-
Novembro	87,8	17	211,2	22	73,2	4	-	-
Dezembro	116,8	15	113,2	11	15,4	5	-	-
Total anual	551	94	1129,7	125	546,4	102	-	-

De um modo geral verifica-se uma menor queda pluviométrica nos meses de Verão (Junho, Julho e Agosto), verificada tanto em termos quantitativos como na redução do número de dias com precipitação. Apesar desta ser uma particularidade do clima Mediterrâneo (diminuição da queda de precipitação nos meses de verão), tem-se verificado nos últimos anos um desvanecer da marcada sazonalidade do regime pluviométrico. De facto, as variações apresentadas revelam uma distribuição mais ou menos homogénea da precipitação entre Janeiro e Maio, com o início da época das chuvas em Setembro, atingindo valores mais elevados entre Outubro e Dezembro, pelo que não se demarca claramente um regime de precipitação mais intensa no Inverno (Dezembro, Janeiro e Fevereiro).

De entre os anos analisados destaca-se o ano de 2006 como bastante chuvoso, visto que o total de precipitação atingiu os 1129,7 mm, por oposição aos anos 2005 e 2007 que

registaram montantes anuais bastante inferiores aos valores médios apontados para Portugal (551,3 mm e 546,4 mm, respectivamente). No que respeita ao ano de 2008, até ao dia 9 de Outubro, o total de precipitação já tinha atingido os 460 mm.

Contudo, as maiores quedas pluviométricas fizeram-se sentir em diferentes meses, para os vários anos analisados. O ano de 2008 mostrou ser um dos que apresentou maior número de dias com precipitação, especialmente nos meses de Janeiro, Abril, Maio, Junho e Setembro, tendo mesmo registado os maiores montantes de precipitação nos meses de Janeiro e Abril. Contudo, nos meses de Outubro e Novembro, o maior número de dias com precipitação e os maiores quantitativos pluviométricos fizeram-se sentir no ano 2006. O ano 2007 destaca-se pelos elevados valores registados em Fevereiro. Por outro lado, apesar do ano 2005 se ter revelado bastante seco foi o que registou maior número de dias com chuva.

Dos valores mensais de precipitação, destacam-se ainda os elevados montantes que se fizeram sentir entre Outubro e Novembro do ano de 2006, tendo mesmo registado sido registada uma cheia no dia 26 de Outubro (Figura 45), como resultado de uma queda pluviométrica de 92 mm nesse dia, ocorrida após uma



Figura 45 – Cheia registada no dia 26 de Outubro de 2008, na ESAC.

série de dias com precipitação. De notar que a precipitação registada neste dia foi superior ao valor acumulado em alguns meses. As elevadas quedas pluviométricas registadas em Outubro e Novembro também se reflectem claramente nas anomalias médias mensais de precipitação relativamente ao valor médio registado entre 1971 – 2000 (75 mm), registadas na Figura 46.

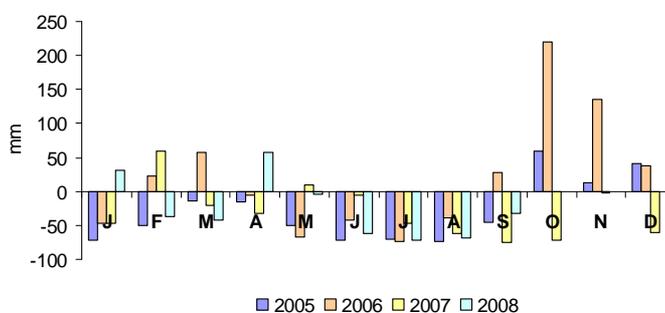


Figura 46 – Variações da precipitação média mensal a partir do ano 2005, relativamente ao valor médio observado entre o período 1971-2000.

Tal como acima referido, o ano de 2006 foi bastante chuvoso, destacando-se claramente um aumento da precipitação em relação aos valores médios entre 1971-2000, em especial nos referidos meses de Outubro e Novembro. De referir ainda que, entre os 4 anos analisados, o ano de 2006 foi o único que apresentou valores de precipitação superiores à média no mês de Setembro.

O ano de 2007, por seu turno, registou sempre valores médios de precipitação inferiores a 75 mm, com excepção do mês de Fevereiro e Maio, enquanto em 2005 os registos apenas indicam valores superiores aos médios entre os meses de Outubro e Dezembro.

Relativamente ao ano 2008, destacam-se os valores médios de precipitação registados em Janeiro e Abril, cerca de 50 mm, que contrariam a tendência de diminuição da média registada nos outros anos, tal como acima referido.

5.3.2 Escoamento superficial

Ao contrário de todas as outras componentes do ciclo hidrológico, o escoamento superficial pode ser medido na sua totalidade, a partir do caudal de um curso de água, que exprime a relação entre o volume de água que passa numa determinada secção e que resulta da contribuição de toda a bacia hidrográfica a montante, e o respectivo tempo de passagem.

Os valores de escoamento superficial foram avaliados a partir dos dados de caudal na ribeira dos Covões, registados a partir de um limnígrafo instalado numa secção do canal preparada para o efeito, que efectua leituras do nível de água a cada 5 minutos. O período de registo do limnígrafo iniciou-se a 1 de Fevereiro de 2005. Contudo, devido a problemas técnicos, apenas se conseguiram recolher dados até 29 de Dezembro desse mesmo ano de 2005, tendo as tentativas aplicadas para a sua resolução apenas sido atingidas em Dezembro de 2007. Assim, após este prolongado período de tempo, foi possível voltar a ter registos do caudal da ribeira a partir de 16 de Dezembro de 2007. As variações dos valores médios diários durante o período de registo do limnígrafo são apresentadas na Figura 47 e, comparadas com os dados pluviométricos na Figura 48.

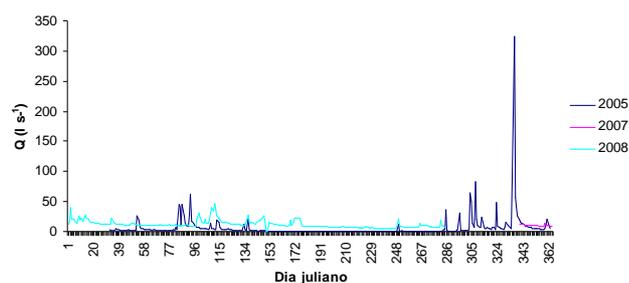


Figura 47 – Variação do caudal médio horário, durante o período de registo do limnigrafo.

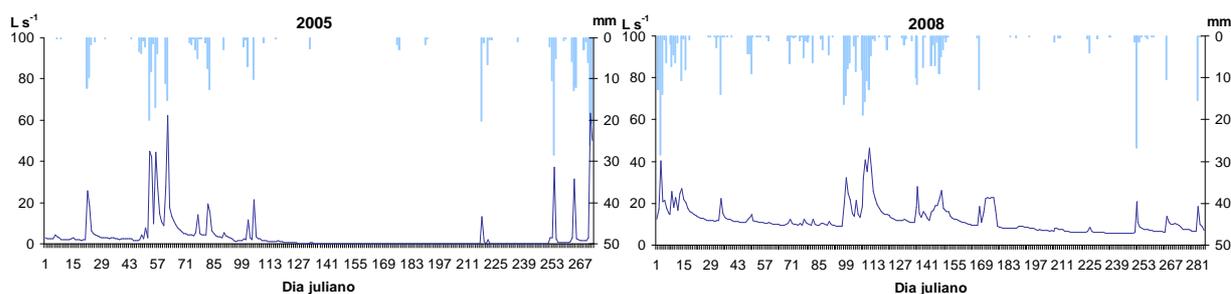


Figura 48 – Variação diária da precipitação e escoamento superficial ao longo do ano, para o período de registo do limnigrafo.

A variação anual do caudal acompanha o regime de precipitação, notório com o aumento de caudal durante as chuvadas, tal como referenciado por Santos & Miranda (2006). É também perturbado pelas estações do ano, diminuindo durante os meses de Verão, como resultado não apenas da menor queda pluviométrica, mas reflectindo também a acção da maior taxa de evaporação, associada a temperaturas mais elevadas. Tal como indicado por Almeida (2007) para uma série de cursos de água, também a ribeira dos Covões regista os menores caudais nos meses de Agosto e Setembro.

De notar que os picos de cheia identificados na bacia da Ribeira dos Covões, a 26 de Outubro de 2006, apesar de não termos registos de caudal, ocorreram quando a precipitação diária atingiu os 92 mm, registados na sequência de períodos contínuos com grande quantidade de precipitação. Este facto parece indicar que a transmissão de água das vertentes para o curso de água acontece sobretudo através do modelo proposto por Hewlett (1961), que refere que após a infiltração, a água sofre movimentos laterais no interior do solo em direcção à base das vertentes, onde forma áreas saturadas que se expandem ou retraem em resposta a episódios chuvosos (Ferreira, 2008). Com efeito, menor dimensão dos picos em resposta a precipitações intensas após períodos secos parece demonstrar que a escorrência segundo o modelo de Horton (1933), que nos nossos climas acontece

sobretudo em áreas com solos bastante alterados, possui uma influência limitada na transmissão de água das vertentes para o curso de água da Ribeira dos Covões.

Como reflexo da menor queda pluviométrica ocorrida no ano 2005, os caudais registados apresentaram valores de escoamento de base inferiores aos de 2008, atingindo mesmo resultados nulos durante o Verão. Contudo, apesar dos baixos quantitativos de precipitação, o ano de 2005 revelou elevados picos de caudal que se destacam pela sua magnitude, onde se evidencia claramente o registo médio diário de 323 L s^{-1} no dia 2 de Dezembro (dia juliano número 336), tendo o caudal máximo atingido mesmo os 1027 L s^{-1} (Figura 49).

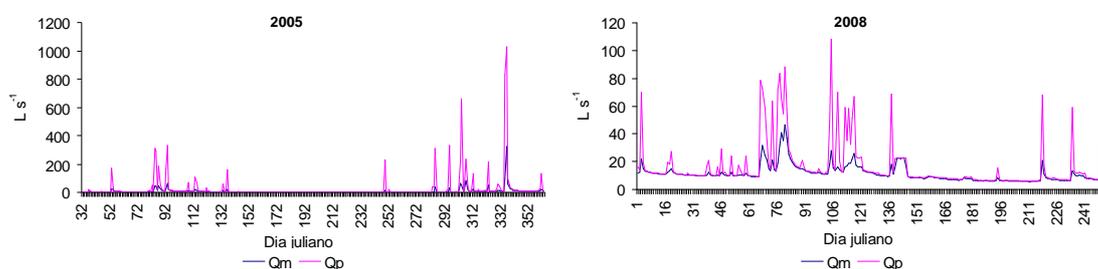


Figura 49 – Relação entre o caudal médio diário (Q_m) e o caudal máximo diário (Q_p) ao longo do ano, para o período de registo de dados do limnigrafo.

Por outro lado, apesar do ano 2005 apresentar sempre uma relação directa entre os caudais médio e máximo diários, o mesmo não foi observado no ano 2008, uma vez que o maior valor médio diário foi registado a 19 de Março (dia 78; 41 L s^{-1}), enquanto o valor máximo foi assinalado em 18 de Abril (dia 108; 70 L s^{-1}), o que pode reflectir diferentes intensidades de precipitação, o que pode estar associado a outro tipo de mecanismo de transmissão de água das vertentes para o curso de água.

A influência da estação do ano na geração de escoamento superficial, acima referida, encontra-se visivelmente patente na Figura 50, que mostra a relação entre a variabilidade mensal da precipitação e do escoamento ao longo do ano.

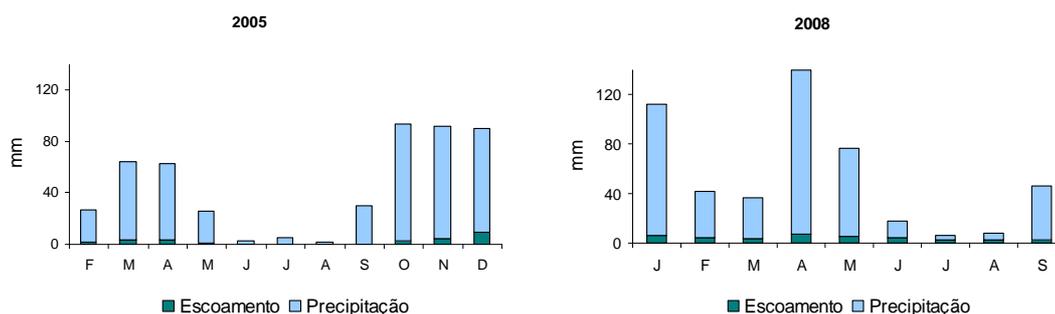


Figura 50 – Relação mensal entre a precipitação e o escoamento superficial gerado, durante o período de registo do limnígrafo.

Da análise da Figura 50, observa-se que a bacia não tem um padrão de escoamento homogéneo ao longo do ano, associado provavelmente às condições anteriores. A fracção do escoamento relativamente à precipitação total foi sempre superior no ano 2008, com excepção do mês de Abril, sendo mesmo superior ao dobro nos meses de Fevereiro, Março e Setembro (5,7%, 5,1% e 0,7%, respectivamente para 2005 e, 11,5%, 11,9% e 7,2% em 2008), e, ainda, nos meses de Verão. Os resultados obtidos são concordantes com o referido por Santos & Miranda (2006), que apontam para uma concentração de 70% do escoamento anual nos quatro meses entre Dezembro e Março, tendo-se observado um total de 67,4% para os dados relativos a 2005, com a exclusão de Janeiro.

Relativamente a 2008, uma vez que ainda não existem dados totais anuais, podemos apenas referir que, nos meses secos, o escoamento corresponde a 9,6% do total de precipitação, enquanto nos meses de Janeiro, Fevereiro e Março, a fracção de escoamento representa um total de 8,4% da precipitação registada neste período.

No ano 2005, as menores percentagens de escoamento foram registadas em Julho, Agosto e Setembro (0% nos dois primeiros e 0,7% em Setembro), enquanto as maiores foram identificadas em Dezembro, Abril e Fevereiro (11,3%, 6,1% e 5,7%), apesar de estarem associadas a diferentes quantitativos de precipitação: 81,4mm, 25,0mm e 59,4mm, respectivamente. No entanto, estes valores não representam os máximos mensais, e estão associados a diferentes dias com precipitação (15 dias em Dezembro, 4 dias em Fevereiro e 12 dias em Abril).

De acordo com vários autores, o volume de escoamento gerado depende de vários factores, nomeadamente da intensidade e duração dos eventos chuvosos, mas também da própria

orientação da chuva e, ainda, do teor de humidade do solo antecedente (Tesar *et al.*, 2003; Kostka & Holko, 2003; Parikh *et al.*, 2005; Lencastre & Franco, 2006; Wang *et al.*, 2008). Segundo Durrans *et al.* (2004), eventos pluviométricos de pequena e média intensidade (precipitação inferior a 40 mm), contribuem para a maior parte do volume de escoamento total anual das bacias hidrográficas, devido à frequência com que acontecem. Por outro lado, Belmonte & Beltán (2001), acentuam o comportamento do solo, referindo que no Verão, a precipitação convectiva intensa pode alterar a estrutura do solo para ultrapassar rapidamente a capacidade de infiltração e gerar fluxos hortonianos, enquanto no Outono-Inverno, as chuvas são menos intensas mas mais persistentes, e o sistema responde mais gradualmente. Além disso, estes autores referem ainda o comportamento hidrofóbico do solo como um parâmetro importante nos processos de geração de escoamento superficial.

Os dados de 2008 apontam para resultados diferentes no que respeita aos quantitativos de escoamento superficial gerados, e que se traduzem por elevadas fracções de escoamento relativamente ao total de precipitação nos meses de Junho, Julho e Agosto (35,7% de escoamento, 98,4% e 38,5%, respectivamente), salientando-se ainda o mês de Agosto, onde praticamente toda a precipitação foi convertida em escoamento.

A maior geração de escoamento superficial identificada no ano 2008 (9,1% do total de precipitação, até ao mês de Setembro) relativamente ao ano de 2005 (5,5% do total de precipitação anual, com excepção do mês de Janeiro), pode dever-se à maior queda pluviométrica, bem como reflectir o impacto dos processos de desflorestação e urbanização que se têm vindo a fazer sentir de forma mais intensa na bacia, em especial a partir do ano 2005. De facto, de acordo com um estudo realizado por White & Greer (2006) numa bacia hidrográfica da Califórnia (Los Penasquitos Creek), o aumento de 9% para 37% da área urbanizada foi acompanhado por um aumento médio anual de escoamento total de 4%, o que representa um aumento acima dos 200% entre 1973 e 2000. Estes autores observaram ainda que a urbanização promove uma diminuição do volume de escoamento de base, como resultado da diminuição da infiltração da precipitação para os aquíferos de água subterrânea, associado ao aumento da superfície impermeável, facto já anteriormente referido por Brun & Band (2000). Contudo, White & Greer (2006) apontam ainda como outra consequência da urbanização o aumento do escoamento de base durante o período seco, devido aos sistemas de drenagem, rede de saneamento, e irrigação de espaços verdes,

na medida em que o excesso de água utilizado durante a rega irá confluír para a rede de drenagem através dos sistemas municipais. Contudo, uma vez que a irrigação na bacia da Ribeira dos Covões não constituiu um processo importante, este facto não parece estar associado aos elevados valores de escoamento obtidos nos meses de Verão de 2008.

Uma vez que os coeficientes de escoamento variam grandemente com as características da bacia hidrográfica e do regime de precipitação, é difícil realizar comparações com resultados obtidos noutras bacias hidrográficas. Contudo, referem-se a título exemplificativo que as fracções anuais de escoamento da bacia da Bouça (centro de Portugal), maioritariamente florestal, revelaram valores de escoamento anual que variaram entre 3% e 24% do total de precipitação, nos anos de 1989 e 1992 (Ferreira *et al.*, 1998), enquanto na bacia urbanizada de Rambla de la Viuda (Valência, Espanha), se registaram valores entre 4,5% e 16,5% em diferentes períodos do ano e em diferentes anos (Belmonte & Beltrán, 2001).

Estudo de eventos chuvosos

Com o objectivo de estudar a magnitude e duração dos eventos de precipitação-escoamento superficial, analisaram-se os registos de precipitação e caudal, recolhidos em intervalos de tempo de 5 minutos. Esta análise à escala temporal dos minutos permite distinguir entre picos de cheia múltiplos e simples, apresentando-se e discutindo-se alguns a título exemplificativo de seguida (Figuras 51, 52 e 53). Contudo, esta análise permitiu ainda verificar que os dados do pluviómetro e do limnógrafo, relativos ao ano de 2005, recolhidos por computadores diferentes, apresentam diferenças temporais que inviabilizam uma análise detalhada dos dados. Deste modo, o estudo de hidrogramas baseou-se apenas nos dados de 2008.

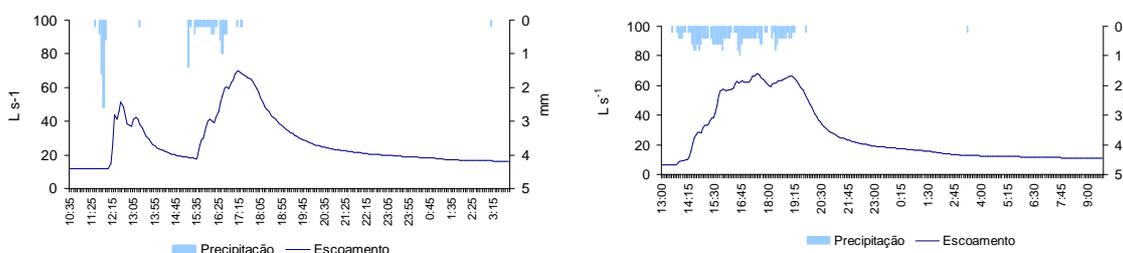


Figura 51 - Hidrogramas gerados por picos de precipitação múltiplos, em 2 de Fevereiro (esquerda) e 5 de Setembro de 2008 (direita).

O estudo dos hidrogramas revela a influência do carácter da precipitação no processo de geração de escoamento superficial, nomeadamente no que respeita ao regime e intensidade de precipitação. No caso do hidrograma apresentado na Figura 51 – esquerda, relativamente aos dados do mês de Fevereiro, pode observar-se o nítido impacto da interrupção temporal do evento chuvoso na formação de dois picos de cheia. O primeiro pico apresenta um caudal máximo de 52 L s^{-1} , que resultou da queda de 5,4 mm de precipitação em cerca de 30 minutos ($10,8 \text{ mm h}^{-1}$, com uma intensidade máxima de $31,2 \text{ mm h}^{-1}$), após um período antecedente de 14 dias sem chuva. Este evento chuvoso originou um hidrograma com um tempo de crescimento de cerca de 95 minutos, que atingiu o máximo às 12:35. Após um período de paragem de 190 minutos, o início de uma nova chuvada de menor intensidade ($4,3 \text{ mm h}^{-1}$, com intensidade máxima de $16,8 \text{ mm h}^{-1}$), mas com uma duração cerca de 95 minutos, originou um novo pico de caudal mais acentuado (máximo de 70 L s^{-1}) desenvolvido de forma mais lenta que o primeiro (tempo de crescimento de 115 minutos), cuja diminuição progressiva do escoamento directo se desenvolveu durante 135 minutos. Contudo, apesar da primeira chuvada se ter feito sentir após um prolongado período sem chuva, e ter correspondido a uma chuvada mais intensa, num menor espaço de tempo, as fracções de escoamento nos dois picos não variam muito, atingindo apenas um valor ligeiramente mais elevado no primeiro pico (0,88% para o primeiro pico e 0,80% no segundo).

Por outro lado, a queda de 25,4 mm de precipitação (Figura 51 - direita) durante um período prolongado de 5,4 horas ($4,7 \text{ mm h}^{-1}$), com uma intensidade máxima de 1 mm em 5 minutos (12 mm h^{-1}), registada em 5 de Setembro (após 19 dias sem chuva), originou um hidrograma com um tempo de base de 7 horas, sem um pico de caudal isolado (valor máximo de $66,3 \text{ L s}^{-1}$). Neste caso, a fracção de escoamento representou 1,07% do total da precipitação.

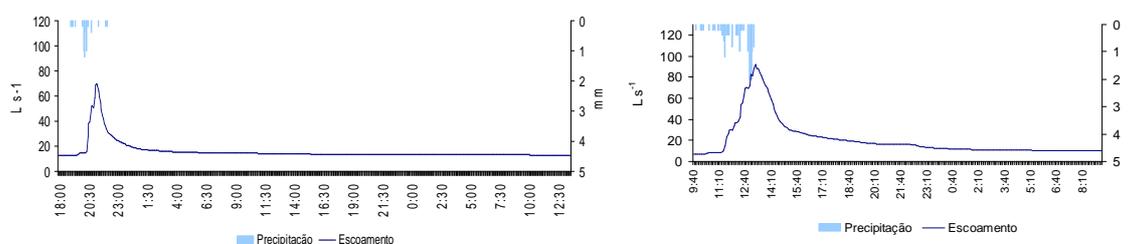


Figura 52 - Hidrogramas gerados por picos de precipitação isolados, em 18 de Maio (esquerda) e 7 de Outubro de 2008 (direita).

No que respeita à análise dos hidrogramas associados a picos de cheia simples é claramente observável um pico de caudal bem definido. No caso do pico gerado a 18 de Maio (Figura 52 - esquerda), com um máximo de 70 L s^{-1} às 21:15, resultado duma precipitação descontínua ($2,9 \text{ mm h}^{-1}$) que atingiu um máximo de $14,4 \text{ mm h}^{-1}$, observa-se que apresentou um tempo de crescimento do hidrograma de 2,35 h. Já relativamente ao pico gerado a 7 de Outubro (Figura 52 - direita), a passagem do escoamento directo na secção foi mais prolongada (4h), associado a um tempo de crescimento também mais longo (3,5h). Este escoamento resultou dum período de precipitação mais prolongado (precipitação acumulada $15,2 \text{ mm}$, com intensidade de $4,5 \text{ mm h}^{-1}$), que originou um pico de caudal mais elevado (92 L s^{-1}).

De referir ainda que enquanto o hidrograma da Figura 52 - esquerda surge após um período de 16 dias sem chuva, originando um escoamento de 4,06%, o hidrograma de 7 de Outubro (Figura 52 - direita) surge na sequência de uma série de episódios chuvosos (o último foi registado 8 h antes), originando uma fracção de escoamento mais baixa de 1,95%.

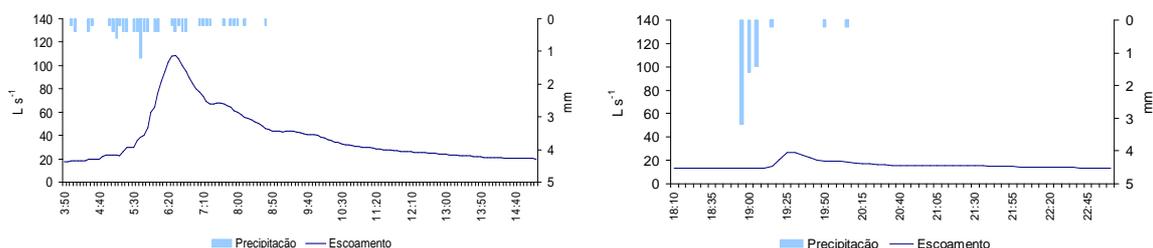


Figura 53 - Hidrogramas com maior pico de caudal (esquerda), gerado a 15 de Maio, e com reduzido pico de caudal (direita), registado a 19 de Fevereiro.

A Figura 53 pretende mostrar as diferenças entre o maior pico de cheia do ano 2008 (108 L s^{-1}), registado a 15 de Maio (figura da esquerda), e um pico de pequena intensidade (27 L s^{-1}), observado a 19 de Fevereiro (figura da direita), após um período de vários eventos chuvosos. O primeiro está associado a uma precipitação de $2,9 \text{ mm h}^{-1}$, com um máximo de $7,2 \text{ mm h}^{-1}$, originando uma fracção de escoamento de 2,14%, enquanto o hidrograma de Fevereiro resulta duma precipitação bastante mais intensa de $15,36 \text{ mm h}^{-1}$ (máximo de $38,4 \text{ mm h}^{-1}$), que proporcionou uma fracção de escoamento superficial de 0,56%. Apesar dos regimes de precipitação bastante distintos, o tempo de crescimento do pico de caudal é sensivelmente o mesmo (55 minutos em Maio e 40 minutos em Fevereiro), apesar do tempo de base ser bastante diferente (3,4 h no hidrograma de Maio e 1h no de Fevereiro).

Estes resultados parecem revelar que a intensa chuvada que se fez sentir no hidrograma da direita, não foi homogênea em toda a bacia, podendo ter-se feito sentir mais na zona onde o pluviômetro está instalado.

Apesar das diferenças observadas nos diversos hidrogramas apresentados, salienta-se uma característica comum a todos eles, e que está associada à rapidez com que a precipitação é conduzida para o curso de água principal, por vezes em períodos de tempo inferiores a 1h, promovendo um rápido aumento do caudal. No entanto, a contribuição da precipitação para os hidrogramas é bastante pequena, o que sugere que o pico de caudal é gerado muito rapidamente apenas em pequenas partes da bacia. Assim, devemos ter em consideração a importância dos processos de intercepção, uma vez que cerca de 48% da bacia apresentava um uso do solo florestal, no ano 2000. As áreas agrícolas, que representavam cerca de 10% em 2000, também contribuem positivamente para a rápida infiltração, tendo em consideração as taxas de infiltração identificadas na caracterização hidrológica dos solos. Os resultados da monitorização dos vários locais dentro da bacia também revelou valores elevados de condutividade hidráulica dos solos localizados em áreas residenciais, contribuindo também para a rápida infiltração e baixo escoamento superficial identificado na análise dos hidrogramas.

Por outro lado, as reduzidas fracções de precipitação que dão origem a escoamento superficial, também podem estar associadas à litologia dos solos da bacia, tendo em consideração que grande parte é constituída por arenitos. O baixo escoamento pode ser ainda o reflexo dos relativamente reduzidos eventos chuvosos registados, uma vez que o maior foi de 25,4 mm de precipitação, associado a uma intensidade de 4,7 mm h⁻¹ (registado a 2 de Fevereiro).

Contudo, os valores de escoamento verificados durante a análise de eventos chuvosos são bastante inferiores aos 9% determinados para os dados disponíveis relativamente a 2008, o que pode traduzir a importância do escoamento base.

Estes resultados vêm de encontro ao esperado, de acordo com a caracterização geométrica da bacia (coeficiente de forma de 0,28; coeficiente de compacidade de 1,67; densidade de drenagem de 4,2 km km⁻²), que indicava um favorecimento dos processos de escoamento e uma bacia sujeita à ocorrência de picos de cheia. A reduzida dimensão da bacia

hidrográfica em estudo (cerca de 7 km²) também facilita a rápida resposta ao escoamento, tal como referido por outros autores, que salientam ainda a sensibilidade das pequenas bacias às condições humanas e ações antrópicas (Belmonte & Beltán, 2001; Faria & Pedrosa, 2005).

A forma bastante estreita dos hidrogramas, associada a uma ascensão abrupta do escoamento e a tempos de base curtos, é típica de picos de cheia súbitos, entendidos como grandes volumes de descarga que surgem num curto espaço de tempo, colocando em risco bens e vidas humanas (Belmonte & Beltán, 2001; Tesar *et al.*, 2003).

Contudo, a geração de picos de cheia é um processo bastante complexo e que envolve o estudo de diversas variáveis. Por este motivo, a tentativa de relacionar os picos de caudal com os dados disponíveis neste estudo (escoamento, precipitação máxima, precipitação acumulada e duração da precipitação) não permitiu retirar conclusões quanto aos factores relacionáveis.

6. Conclusões

O desenvolvimento das sociedades ao longo dos anos esteve sempre associado aos recursos hídricos, apesar da relação entre as comunidades e os diversos componentes do ciclo hidrológico nem sempre se estabelecer de forma harmoniosa, devido aos impactos de algumas cheias na perda de vidas humanas e bens materiais.

O trabalho desenvolvido procurou estudar os processos hidrológicos numa bacia urbanizada, a Ribeira dos Covões, que revelou ter uma dimensão interessante para este tipo de estudos. Neste sentido, consideraram-se diferentes escalas de análise e distintas metodologias de investigação.

Ao nível da hidrologia dos solos, a caracterização físico-química realizada em 13 locais seleccionados em função do uso do solo e proximidade às linhas de água dentro da bacia. A monitorização destes locais seleccionados revelou ainda variações ao longo do tempo no que respeita ao teor de humidade do solo, hidrofobia e taxa de infiltração, relacionáveis com alguns parâmetros físico-químicos analisados.

Apesar da grande variabilidade temporal da condutividade hidráulica, constatou-se que os valores mais baixos ocorreram na floresta mista de pinhal e eucaliptal (P1), com um valor médio de $0,08 \text{ m d}^{-1}$, enquanto os valores mais elevados, ligeiramente superiores a $1,2 \text{ m d}^{-1}$, foram registados numa área urbana (P6) e numa área agrícola (P8).

Através da análise estatística dos parâmetros físico-químicos do solo monitorizados (textura, densidade aparente, capacidade máxima para a água, capacidade de campo, pH e matéria orgânica), foi possível relacionar a condutividade hidráulica, analisada na camada superficial do solo, com o teor de matéria orgânica, a capacidade máxima para a água (pF 0) e, indirectamente, com a fracção de argila. A matéria orgânica está associada a condições favoráveis ao desenvolvimento da actividade biológica que proporcionam a criação de macroporos no solo, facilitando a passagem da água que assim evita a matriz do solo (Ferreira, 1996; Ritsema, 1998). A relação da condutividade hidráulica com a capacidade máxima para a água, por sua vez, pode estar relacionada com as forças que actuam no solo, nomeadamente as de capilaridade, e são responsáveis pela velocidade de infiltração de água. A inter-relação com o teor de argila, também é compreensível, tendo

em consideração a grande aptidão da argila para a retenção de água e baixa percolação (Costa, 1999; Doerr *et al.*, 2000). Contudo, apesar dos resultados obtidos não o terem demonstrado, diversos autores consideram ainda a porosidade, traduzida indirectamente pela densidade aparente, como um factor fundamental que afecta a velocidade de infiltração da água no solo (Cerdà, 1996; Magalhães, 2000; Casanellas & Reguerín, 2005; Nunes, 2007).

O teor de humidade do solo foi também um parâmetro que exibiu grande variabilidade espacial e temporal, tendo as menores variações sido registadas em dois locais com uso do solo agrícola (P8 - olival e, P13 – culturas anuais), situados próximo de linhas de água. De um modo geral, os locais com menor teor de humidade foram a floresta mista de eucalipto e pinhal (P1) e a área localizada nas imediações, que está a ser sujeita a obras de construção civil (P2).

A humidade foi estatisticamente relacionada com a capacidade de campo, fracção de limo e, indirectamente, com a repelência do solo à água. Alguns casos indicaram ainda uma relação directa com o teor de matéria orgânica e inversa com a fracção de areia. Este parâmetro, variável ao longo do perfil do solo, está associada a quantidade de água que fica retida nos microporos do solo, princípio no qual se baseia o conceito de capacidade de campo. Por outro lado, as diferentes fracções das partículas de solo estão também associadas ao teor de humidade, sendo bem documentada, por exemplo, a baixa capacidade de retenção de água por parte das areias. A matéria orgânica, por seu lado, promove uma melhor coesão entre as partículas do solo, aumentando o poder de retenção de água (Costa, 1999; Doerr *et al.*, 2000).

Relativamente à repelência do solo à água, revelou-se sempre presente nos solos da floresta mista de eucalipto e pinhal (P1) com um carácter extremamente hidrofóbico, e surgiu de forma ligeira em vários locais na monitorização realizada em Julho. De salientar que, durante o período seco (Junho e Julho), o terreno abandonado junto à estrada (P4) revelou um carácter fortemente hidrofóbico, o que pode estar associado ao menor teor de humidade do solo e às emissões provenientes do tráfego rodoviário. Durante o estudo realizado, a hidrofobia foi apenas relacionada com a fracção de argila, o que pode querer indicar a formação de agregados por parte da argila, que assim reduzem a área superficial a ser coberta pela camada hidrofóbica (Doerr *et al.*, 2000).

Quanto à influência da cobertura do solo nos processos de infiltração e geração de escoamento superficial, os ensaios com parcelas fechadas revelaram sempre o mesmo comportamento, com claras diferenças entre solos cobertos e desprotegidos, tal como seria de esperar. As parcelas instaladas em solos totalmente cobertos por vegetação (área de jardim) e manta morta (área florestal), indicaram uma capacidade para a total infiltração de água resultante de eventos chuvosos. Por outro lado, os solos desprotegidos revelaram uma menor capacidade de infiltração de água, proporcionando a geração de escoamento média equivalente a 29% do total de precipitação. Com estas parcelas foi ainda possível perceber que o solo nu responde de forma diferente ao escoamento, em função da humidade do solo antecedente e das características da precipitação.

Em termos da resposta hidrológica de diferentes usos do solo e ao impacto da intervenção humana neste processo, os ensaios de simulação de chuva acusaram uma total infiltração de água nas áreas agrícolas. Comparando os resultados das áreas florestadas e desflorestadas (com solo coberto por restos de biomassa), observou-se que não existem diferenças significativas na fracção de escoamento gerada relativamente ao total de precipitação: 37% na área florestal e 30% na área desflorestada. Quanto às áreas sujeitas à realização de obras, indicaram taxas de escoamento superficial mais elevadas: 40% no local intervencionado para a instalação de saneamento básico e 45% no local de construção de uma estrada.

Associado aos elevados volumes de escoamento superficial nas áreas de obras, identificou-se uma grande concentração de sedimentos: $91,8 \text{ g h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ no local de construção da estrada e $307,4 \text{ g h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ no local de instalação do saneamento básico, onde o declive é bastante acentuado (23°). Estes valores têm associada uma fracção significativa de matéria orgânica - por exemplo, no caso das obras para construção de estrada, o conteúdo orgânico representa 55% dos sedimentos. Neste sentido, salienta-se o importante papel que os processos de escoamento superficial podem desempenhar no transporte e dispersão de nutrientes.

No que respeita à resposta hidrológica da bacia da Ribeira dos Covões, constatou-se que revela uma resposta rápida, associada à sua pequena dimensão, mas diferenciada ao longo

do tempo. Durante o ano 2005, ano seco, a bacia registou valores médios de escoamento de 5,5%, relativamente ao total anual de precipitação (sem considerar dados de Janeiro), essencialmente concentrado nos meses de Fevereiro, Março e Dezembro (64% do total anual de escoamento). No entanto, os dados disponíveis para o ano 2008, apontam para valores de escoamento superficial mais elevados (9% entre Janeiro e Setembro), que podem reflectir apenas o efeito da maior queda pluviométrica, mas que podem também querer traduzir o impacto do acentuado processo de urbanização que se tem vindo a registar na bacia, em especial a partir de 2005. A susceptibilidade desta bacia ao processo de urbanização está também bem patente nos hidrogramas analisados, que revelam o aparecimento de picos de cheia súbitos. A pequena contribuição da precipitação para o escoamento superficial, traduzida pelo estudo dos hidrogramas (inferior a 4% da precipitação), revela a importância do processo de infiltração e da sua contribuição para o escoamento de base. O estudo dos eventos chuvosos é fundamental para os processos de avaliação do risco de cheia e planeamento urbano.

Refira-se, ainda, que os dados apresentados constituem resultados preliminares de um estudo mais abrangente, pelo que muito há ainda a estudar e aprofundar no sentido de compreender melhor os resultados. Contudo, o estudo desenvolvido permitiu testar as metodologias de trabalho nesta bacia hidrográfica. A investigação realizada levanta ainda algumas questões pertinentes para futura investigação e que não foram possíveis de avaliar no âmbito deste estudo.

Em termos de trabalho futuro, sugere-se a continuação do processo de monitorização dos parâmetros físicos do solo (humidade, hidrofobia e condutividade hidráulica), considerando ainda o estudo da taxa de infiltração em profundidade, com o intuito de averiguar variações entre períodos secos e húmidos. A monitorização deveria também abranger um maior número de locais dentro da bacia, de modo a compreender a relação dos parâmetros avaliados com o tipo de uso do solo.

A instalação de um maior número de limnígrafos nos cursos de água da ribeira dos Covões, permitiria a recolha de mais informação, permitindo analisar as diferentes respostas hidrológicas de unidades litológicas e geológicas distintas, bem como de áreas com diferentes usos do solo.

A continuação da recolha e análise de dados é fundamental para avaliar diferentes respostas hidrológicas, ao nível da bacia, em diferentes períodos do ano, compreender as suas implicações no que respeita à geração de grandes picos de cheia e, estudar a importância das diferentes variáveis para o risco de cheia.

Tendo em consideração a quantidade de sedimentos arrastada pelo escoamento superficial, observada nos ensaios de simulação de chuva, seria interessante monitorizar a qualidade da água da ribeira dos Covões, no sentido de tentar perceber o impacto da relação precipitação-escoamento no transporte e difusão de nutrientes e poluentes dentro da bacia.

A aplicação de modelos hidrológicos aos dados obtidos poderia ainda constituir uma ferramenta interessante para previsão das implicações hidrológicas resultantes de um processo de urbanização progressiva, importantes factores a ter em consideração no planeamento urbano.

Referências bibliográficas

Arnell, N.W. (1996) The effect of climate change on hydrological regimes in Europe: a continental perspective. *Global Environment Change*, 9, 5-23.

Belmonte, C., Beltrán, S. (2001). Flood events in Mediterranean ephemeral streams (ramblas) in Valencia region, Spain. *Catena*, 45, pp. 229-249

Berthier, E., Andrieu, H., Creutin, J.D. (2004). The role of soil in the generation of urban runoff. Development and evaluation of a 2D model, *Journal of Hydrology*. 299, 252–266

Carvalho, J. (2003). *Formas urbanas*. Coimbra: MinervaCoimbra. 148 p.

Cerdà, A. (2001), *Erosión hídrica del suelo en el territorio Valenciano: el estado de la cuestión a través de la revisión bibliográfica*. Logrono: Geoforma ediciones,. ISBN: 84-87779-44-1

Costa, J. B. (1999), *Caracterização e constituição do solo*. 6ª ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian. 527 p

Coelho, C., Ferreira, A., Baake, M., Deizer, J. (2002). Impacts of prescribed shrubland fire and forest wildfire on overland flow and soil erosion generation processes. In Rubio, J.L., Morgan, R.P.C., Asins, S., Andeu, V. (Eds), *Proceedings of the third international congress man and soil at third millennium*, Geoforma Ediciones, Logrono, 1485-1495

Coelho, C.O.A., Ferreira, A.J.D., Laouina, A., Boulet, A.K., Chaker, M., Nafaa, R., Naciri, R., Regaya, k., Hamza, A., Carvalho, T.M.M., Keizer, J.J. (2004). Changes in land-use and their impact on erosion rates and overland flow generation in the Maghreb region, *Revue des Sciences de L'eau*, pp. 163-180

Coelho, C.O.A., Laouina, A., Regaya, K., Ferreira, A.J.D., Carvalho, T.M.M., Chaker, M., Naafa, R., Naciri, R., Boulet, A.K., Keizer, J.J. (2005). The impact of soil water repellency on soil hydrological and erosional processes under *Eucalyptus* and evergreen quercus forests in the Western Mediterranean, CSIRO Publishing, volume 43, pp. 309-318

Dam, J.C. (1999). Impacts of climate change and climatic variability on hydrological regimes. International Hydrology Series, Cambridge University Press.

Doerr, S.H., Shakesby, F.A., Walsh, R.P.D. (2000). Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance, *Earth-Science Reviews*. 51, pp. 33–65

Estrela, T.; Menéndez, M.; Dimas, M. (2001), *Sustainable water use in Europe*. Copenhagen: European Environment Agency

Ferreira, A. J. D. (1996), “Processos hidrológicos e hidroquímicos em Povoamentos de *Eucalyptus globulus* Labill. E *Pinus Pinaster* Aiton”, *Dissertação apresentada para obtenção do grau de Doutor no ramo de Ciências aplicadas ao Ambiente*. Aveiro: Departamento de Ambiente e Ordenamento

Ferreira, A.J.D., Coelho, C.O.A., Gonçalves, A.J.B., Shakesby, R.A., Walsh, R.P.D. (1998). Impacto f climatic change on slope and catchment hydrology in forest areas, central Portugal, *Teo-Okodynamik*, volume XIX, pp. 165-177

Figueiredo, T.A.F.R. (2001), “Pedregosidade e erosão hídrica dos solos em Trás-os-Montes: contributo para a interpretação de registos em vinhas ao alto na região do Douro”, *Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Agrícola*. Vila Real: Universidade de Trás-Os-Montes e Alto Douro

Foster, S.S.D. (2001). The interdependence of groundwater and urbanisation in rapidly developing cities, *Urban Water*. 3, 185-192

Kirby, M.J., Bracken, L.J., Shannon, J. (2005). The influence of rainfall distribution and morphological factors on runoff delivery from dryland catchments in SE Spain, *Catena*. 62, 136–156

Kostka, Z.; Holko, L. (2003). *Analysis of rainfall-runoff events in a mountain catchment*. Technical Documents in Hydrology. Paris: UNESCO. n°67, p. 21-25

Kundzewicz, Z.W. (2008). Flood risk and vulneratibility in the changing climate, *Annals of Warsaw University of Sife Sciences*, volume 39, pp. 21-31

Lencastre, A.; Franco, F. M. (2006), *Lições de hidrologia*. 3ª ed. Lisboa: Fundação da Faculdade de Ciência e Tecnologia,. 451 p

Llorens, P., Domingo, F. (2007). Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe, *Journal of Hydrology*. 335, 37– 54

Matias, J. S. M. (2002), “A hidrofobia dos solos nas dunas da região centro (Quiaios-Mira) em relação à vegetação e uso de solo”, *Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Ciências das Zonas Costeiras*. Aveiro: Departamento de Ambiente e Ordenamento

Magalhães, M. D. F. S. (2000), “Efeitos de técnicas de preparação do solo e gestão dos resíduos orgânicos em características físico-químicas do solo de plantações florestais”, *Dissertação apresentada para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Florestal*. Lisboa: Instituto Superior de Agronomia

Marroco, J. (2003), *Análise Estatística*. 2ª ed. Lisboa: Edições Sílabo,. ISBN 972-681-331-6

Nunes, A. J. N. (2007), “Abandono do espaço agrícola na Beira Transmontana. Extensão, causas e efeitos ambientais”, *Dissertação apresentada para obtenção do grau de Doutor em Letras (especialidade em Geografia)*. Coimbra: Faculdade de Letras

Old, G.H., Graham, J.L., Packman, J.C., Smith, B. P.G., Lewis, S., Hewitt, E.J., Holmes, M., Young, A. (2003). The impact of a convectional summer rainfall event on river flow and fine sediment transport in a highly urbanised catchment: Bradford, West Yorkshire, *The Science of the Total Environment*. 316, 495–512

Oliveira, M. J.R. (2007), “Determinantes do desenvolvimento do pinhal bravo em áreas dunares: as dunas de Mira”, *Dissertação apresentada para obtenção do grau de Doutor em Letras (especialidade em Geografia Física e Estudos Ambientais)*. Coimbra: Faculdade de Letras

Parikh, P., Michael, A. T., Hoagland, T., Thurston, H., Shuster, W. (2005). Application of market mechanisms and incentives to reduce stormwater runoff. An integrated hydrologic, economic and legal approach, *Environmental Science&Policy*, pp. 1-12

Pato, R. L. S. (2007), “Bacia Hidrográfica da Ribeira dos Covões. Variáveis biofísicas e evolução do uso do solo no período 1958-2002”, *Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Geociências (especialidade em Ambiente e Ordenamento do Território)*. Coimbra: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Prats, S.P. (2007), “Simulações de chuva para a medição e modelação da erosão do solo em áreas florestais recentemente ardidadas”, *Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente*. Coimbra: Faculdade de Ciências e Tecnologia

Ramier, D., Berthier, E., Andrieu, H. (2004). An urban lysimeter to assess runoff losses on asphalt concrete plates, *Physics and Chemistry of the Earth*. 29, 839–847

Ritsema, C. J. (1998), “Flow and transport in water repellent sandy soils”. Wageningen; CIP

Santos, L. (2004). Caracterização Sócio-Económica dos concelhos- Concelho de Coimbra (Ficha Técnica). Coimbra: Direcção Geral do Ordenamento do Território e Desenvolvimento Urbano – Direcção de Serviços de Estudos e Planeamento Estratégico – Divisão de Estudos e Planeamento. 27 p.

Santos, F. D.; Miranda, P. (2006), *Alterações climáticas em Portugal: Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação – Projecto SIAM II*. 1ª ed. Lisboa: Gradiva,. Depósito Legal: 237231/06

Tavares, A. M. O. S. (1999), “Condicionantes físicas ao planeamento. Análise da susceptibilidade no espaço do concelho de Coimbra”, *Dissertação apresentada para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Geológica (especialidade em Geologia do Ambiente e Ordenamento)*. Coimbra: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. 346 p

Tesar, M.; Miloslav, S., Lichner, L. (2003) *Runoff formation in a small catchment*. Technical Documents in Hydrology. Paris: UNESCO,. nº67, p. 7-12

Tetzlaff, D., Grottker, M., Leibundgut, C. (2005). Hydrological criteria to assess changes of flow dynamic in urban impacted catchments, *Physics and Chemistry of the Earth*. 30, 426–431

Walsh, R.P.D., Coelho, C.O.A., Elmes, P., Ferreira, A.J.D., Gonçalves, A.J.B., Shakesby, R.A., Ternan, J.L., Williams, A.G. (1999). Rainfall simulation plot experiments as a tool in overland flow and soil erosion assessment, north-central Portugal, *Geododynamik*. XIX, 139-152

White, M.D., Greerb, K.A. (2006). The effects of watershed urbanization on the stream hydrology and riparian vegetation of Los Penasquitos Creek, California, *Landscape and Urban Planning*. 74, 125–138

Xiao, Q., McPherson, W.G. (2002). Rainfall interception by Santa Monica's municipal urban forest, *Urban Ecosystems*. 6, 291-302

Outras fontes

Cartografia

IGE: Instituto Geográfico do Exército (2002), *Carta Militar de Portugal – Folha 230 (Coimbra)*. Escala 1:25 000, Série M 888. Lisboa: Edição 3 – IGE

IGE: Instituto Geográfico do Exército (2002), *Carta Militar de Portugal – Folha 241 (Coimbra-Sul)*. Escala 1:25 000, Série M 888. Lisboa: Edição 3 – IGE

INETI: Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (2005), *Carta Geológica de Portugal – Folha 19-D (Coimbra-Lousã)*. Escala 1:50 000. Lisboa: Edição 1 - INETI

Informação estatística

INE: Instituto Nacional de Estatística, 1950 – IX Recenseamento Geral da População. Lisboa: Instituto Nacional de Estatística

INE: Instituto Nacional de Estatística, 1960 – X Recenseamento Geral da População. Lisboa: Instituto Nacional de Estatística

INE: Instituto Nacional de Estatística, 1970 – XI Recenseamento Geral da População. Lisboa: Instituto Nacional de Estatística

INE: Instituto Nacional de Estatística, 1981 – XII Recenseamento Geral da População. Lisboa: Instituto Nacional de Estatística

INE: Instituto Nacional de Estatística, 1991 – XIII Recenseamento Geral da População. Lisboa: Instituto Nacional de Estatística

INE: Instituto Nacional de Estatística, 2001 – XIV Recenseamento Geral da População.
Lisboa: Instituto Nacional de Estatística

INMG: Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica (1988), O clima de Portugal.
Normais climatológicas da região de “Beira Litoral”, correspondente a 1941-1970.
Fascículo XL, Volume 1-1ª Região. Lisboa: INMG. ISSB 0870-4764

ANEXOS

ANEXO I - Evolução do quadro normativo

A água é um recurso finito que deve ser gerido de forma sustentável, de acordo com as necessidades populacionais e ambientais. Neste sentido, a União Europeia e Portugal têm, ao longo dos anos e especialmente nos últimos 10 anos, vindo a tomar consciência da importância da gestão da água e a desenvolver diversas medidas legais com os objectivos de protecção e gestão dos recursos hídricos, tentando amenizar a pressão crescente a que estão sujeitos, tendo em vista, nomeadamente, prevenir e minimizar os riscos e impactes das cheias.

Os anos que antecederam à publicação do regime jurídico que regulamenta os terrenos do domínio público hídrico, em 1971, (**Decreto-Lei nº 468/71** de 5 de Novembro) foram marcados por episódios de cheias, nomeadamente a grande cheia do Mondego em 1963. Estes acontecimentos impulsionaram a criação do regime jurídico de 1971 como resposta à necessidade de unificação e actualização do que se entende por terrenos do domínio público hídrico - terrenos conexos com as águas, isto é, leitos, margens e zonas adjacentes.

Este diploma legal institui *“a sujeição a determinadas restrições de utilidade pública de terrenos situados para além das margens, mas em posição tal que tenham de ser considerados como terrenos ameaçados pelo mar ou como terrenos ameaçados pelas cheias (dos rios)”* (nº2, Decreto-Lei nº 468/71).

A classificação, por parte das instâncias de governação central, de determinadas áreas como zonas adjacentes conferia legitimidade institucional para controlo do crescimento urbanístico em tais áreas, controlo esse anteriormente inviável devido à inexistência de regras formais que legitimassem tais acções preventivas (Silva, 2003).

No ano de 1987, aquele regime é submetido a revisões no que respeita às zonas adjacentes, delas resultando a publicação do **Decreto-Lei nº 89/87** de 26 de Fevereiro, onde se escreve: *“conclui-se que as cheias são devidas, sobretudo, ao aumento das áreas impermeabilizadas e à obstrução das áreas contíguas aos cursos de água pela ocupação urbana. (...) destes trabalhos resulta não só a necessidade de realização de obras de regularização fluvial mas também a de evitar a ocupação urbana das áreas contíguas aos cursos de água ameaçadas pelas cheias.”*

Este novo regime estabelecido em 1987 introduz algumas modificações às condicionantes impostas às zonas adjacentes, alargando tais condicionantes a outras áreas ribeirinhas que não apenas as classificadas como zonas adjacentes. Estas zonas adjacentes são consideradas como “*áreas de ocupação edificada proibida e de ocupação edificada condicionada*”. Abre-se ainda aos municípios a possibilidade de serem eles próprios a proporem a classificação de determinada área como zona adjacente (Silva, 2003).

Deste modo, o Decreto-Lei n.º 89/87 tenta superar as limitações induzidas pelo regime de 1971, o qual fazia depender a aplicação de mecanismos de controlo dos usos do solo da classificação prévia de determinada área como zona adjacente. Com efeito, de acordo com o novo regime, eventuais projectos de urbanização e operações de loteamento em áreas contíguas a cursos de água, classificados ou não como zonas adjacentes, carecem de parecer vinculativo do Instituto da Água. Para além desta modificação, o regime 89/87 introduz alterações quanto ao papel das instâncias de governação local no processo de institucionalização de medidas preventivas (Silva, 2003).

Aos regimes de regras anteriormente mencionados, junta-se um outro, datado de 1998 (**Decreto-Lei 364/98**, de 21 de Novembro), que procura estimular, por via da regulamentação, a adopção de medidas não estruturais específicas para áreas urbanas. No entanto, a inversão na direcção do estímulo à co-responsabilização promovida pelo regime jurídico de 89/87, torna-se mais evidente no regime jurídico de 364/98, criado com o objectivo de travar os processos de desenvolvimento urbanístico desatentos ao risco de cheia.

Neste sentido, o Decreto-Lei nº 364/98 institui que as Câmaras procedam à delimitação das áreas (urbanas ou urbanizáveis) vulneráveis ao risco de inundação, numa tentativa de articulação com outros planos de ordenamento: “... *em zonas vulneráveis à ocorrência de cheias, as áreas sujeitas ao risco de inundação devem ser consideradas nos planos municipais de ordenamento do território (PMOT), como factor a ter em conta cumulativamente com outros factores condicionantes do uso do solo.*” O referido regime jurídico, considera ainda a “*Elaboração de uma cartografia de zonas inundáveis, a escala adequada, abrangendo os perímetros urbanos, e que, no planeamento e desenho urbanos, constitua um contributo importante na preparação,*

designadamente, de medidas preventivas e de formas de actuação em caso de emergência.”

Salienta-se ainda o facto de, neste regime, se fazer referência às consequências da intervenção humana no risco de cheia: *“Os riscos de cheia podem ser agravados em zonas urbanas devido às alterações induzidas nas condições de drenagem natural, como sejam a obstrução das áreas contíguas aos cursos de água, a impermeabilização de extensas áreas e a condução de águas pluviais por redes de colectores, nem sempre dimensionadas para fazer face a situações de precipitação anormal, sendo também maior a extensão dos prejuízos humanos e materiais que ocorrem naquelas zonas, motivados pela concentração de recursos que o seu carácter urbano determina.”*

Segundo Silva (2003), estes regimes de regras formais foram surgindo sem enquadramento num programa de âmbito nacional de gestão e controlo do risco de cheia, direccionado para a integração com o ordenamento do território. Considera que, em Portugal, até ao final da década de 90, o controlo do risco de cheia se alicerçou fundamentalmente em artefactos físicos como barragens ou diques, quando estas existem. Silva (2003), realça ainda a forma como o domínio hídrico viveu à custa da aplicação de medidas estruturais e tecnológicas, direccionadas para o armazenamento e utilização do recurso água e, simultaneamente, controlo das “impetuosidades” dos rios.

No entanto, para além da legislação relativa ao domínio hídrico, foi instituída, no âmbito da política de ordenamento do território nacional, a Reserva Ecológica Nacional (REN), através do **Decreto-Lei nº 321/83** de 5 de Julho, que considera a delimitação de ecossistemas interiores, como por exemplo os leitos dos cursos de água e as cabeceiras dos cursos de água, e a sua integração nos instrumentos que definem a ocupação física do território. Este regime jurídico foi posteriormente revogado pelo **Decreto-lei n.º 93/90** de 19 de Março, onde se passa a considerar ainda, por exemplo, os “leitos dos cursos de água e zonas ameaçadas pelas cheias” nas áreas de REN.

No entanto, na tentativa de ultrapassar as lacunas existentes entre a integração do ciclo hidrológico com o ordenamento e gestão dos usos do solo, foram publicados o Plano Nacional da Água (PNA) e os Planos de Bacia Hidrográfica (PBH).

O Plano Nacional da Água, elaborado de acordo com o **Decreto-Lei nº45/94** de 22 de Fevereiro, define orientações de âmbito nacional para a gestão integrada das águas,

fundamentadas em diagnóstico da situação actual e na definição de objectivos a alcançar através de medidas e acções. Este plano visa a articulação entre diversas instituições, nomeadamente entre o então designado Instituto da Água e a Protecção Civil, para a gestão eficaz dos recursos hídricos nacionais, através de medidas estruturais e não estruturais, de modo a reduzir os riscos, nomeadamente, de cheia. O plano visa ainda a criação de uma série de Planos de Emergência do Sistema de Protecção Civil, nomeadamente o Plano Especial Operações Cheias a nível nacional, e o Plano Especial Operações Cheias para a região de Coimbra.

O Decreto-Lei nº 45/94 foi posteriormente revogado pelo **Decreto-Lei n.º 112/2002** de 17 de Abril, onde se considera também os efeitos das alterações climáticas na ocorrência de fenómenos de precipitação intensa ou prolongada que dão origem a situações de cheia. O documento refere ainda que *“A estes desafios vem juntar-se uma outra pressão que poderá vir a constituir-se como um dos maiores desafios da humanidade do próximo século: o aquecimento global, em resultado do efeito de estufa, com prováveis efeitos hidrológicos muito significativos.”*

Relativamente aos Planos de Bacia Hidrográfica, que definem orientações de valorização, protecção e gestão equilibrada da água, de âmbito territorial, para uma bacia hidrográfica ou agregação de pequenas bacias hidrográficas, de acordo com o **Despacho Ministerial 98.12.31** e com o **Decreto-Lei 45/94 de 22 de Fevereiro**. Estes planos partem do princípio que a gestão dos recursos hídricos deve considerar a unidade territorial natural, definida pela bacia hidrográfica ou pelo conjunto de bacias hidrográficas ou zonas consideradas afins numa óptica de utilização da água, e ser orientada numa perspectiva de racionalidade económica, garantindo as disponibilidades adequadas, com a quantidade e qualidade exigíveis (Nunes, 2006). No decurso deste regime jurídico, foi publicado a 1 de Março de 2002 o **Decreto Regulamentar n.º 9/2002**, relativo ao Plano de Bacia Hidrográfica do Mondego, que abrange a área de estudo alvo desta dissertação. Trata-se de um plano sectorial que, assentando numa abordagem conjunta e interligada de aspectos técnicos, económicos, ambientais e institucionais, envolvendo os agentes económicos e as populações directamente interessadas. Este plano tem em vista estabelecer de forma estruturada e programática uma estratégia racional de gestão e utilização da bacia hidrográfica do Mondego, em articulação com o ordenamento do território e a conservação e protecção do ambiente. É

efectuado o levantamento das medidas de defesa contra cheias existentes (referindo não se conhecerem obras de regularização na bacia hidrográfica), bem como das medidas institucionais, que acentuam a inter-relação com o Plano Regional de Ordenamento do Território (PROT), o Plano Director Municipal (PDM) e a Reserva Ecológica Nacional (REN).

No PBH do Mondego foi efectuada a caracterização da situação de referência, tendo sido caracterizados de forma extensiva alguns aspectos particulares, dos quais se salientam as situações hidrológicas extremas e de risco, com destaque para as cheias e as secas. Neste âmbito foi realizada uma análise de cheias, que compreendeu a identificação das zonas críticas de inundação, que correspondem à zona do Baixo Mondego, e a caracterização dos caudais de ponta e volumes das cheias. Efectua-se ainda a análise do risco de erosão como resultado das cheias, salientando-se que na bacia do Mondego “66 %, apresenta moderado risco de erosão real, enquanto que, 12 %, apresenta elevado risco de erosão real” (capítulo 1, Decreto Regulamentar n.º 9/2002). No capítulo 2 do referido regulamento, apresentam-se programas de medidas associadas aos objectivos estratégicos como sejam a prevenção e minimização dos efeitos das cheias, onde se menciona que “no que diz respeito às situações de cheia, torna-se necessário proceder à identificação das áreas sujeitas a risco de inundação e ao estabelecimento das cartas de risco que servirão de base à definição das regras de ocupação”.

A parte VI do Decreto Regulamentar n.º 9/2002 apresenta normas orientadoras relativas, nomeadamente, aos objectivos de protecção contra cheias e inundações, bem como ao inventário e delimitação das zonas de risco de inundação. Das normas apresentadas destacam-se as seguintes:

- “Deverão ser tomadas as medidas necessárias para limitar ao máximo a ocupação dos leitos de cheia, para impedir o aumento dos caudais de cheia provenientes de acções antrópicas...” ,

- ”Deverão ser tomadas as medidas necessárias para impedir o aumento dos caudais de cheia provenientes de acções antrópicas, como sejam aumento das áreas impermeáveis nas bacias ou diminuição do tempo de concentração nas mesmas, nomeadamente em processo de licenciamento de domínio hídrico de novas

urbanizações ou outras ocupações do território que conduzam a uma alteração das características do solo ou do coberto vegetal”

- “As áreas identificadas como zonas de risco de inundação deverão ser classificadas pelo seu grau de risco, de acordo com a respectiva probabilidade de inundação, para períodos de retorno de 5, 25, 50 e 100 anos.”

A nível nacional, salienta-se ainda a **Resolução da Assembleia da República n.º 66/99**, relativa à Convenção sobre Cooperação para a Protecção e o Aproveitamento Sustentável das Águas das Bacias Hidrográficas Luso-Espanholas e o Protocolo Adicional, assinados em Albufeira em 30 de Novembro de 1998. O tema das cheias foi abordado nesta convenção, definindo-se que as Partes realizam estudos conjuntos sobre cheias para definir as medidas conducentes à mitigação dos seus efeitos, em particular as normas de operação das infra-estruturas hidráulicas pertinentes em situações de cheia. Estabelece ainda que, cada Parte coordena as suas actuações e estabelece os mecanismos excepcionais para minimizar os efeitos das cheias.

A partir do ano 2000, a União Europeia apresentou um papel preponderante na publicação de diversas Directivas no âmbito da água, transpostas para o direito interno de cada Estado Membro. Assim, menciona-se a **Directiva 2000/60/CE** do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de Outubro de 2000, comumente conhecida como Directiva-Quadro da Água, e recentemente transposta para a ordem jurídica nacional pela **Lei 58/2005**, de 29 de Dezembro. Esta Directiva estabelece um conjunto de princípios essenciais a cumprir no âmbito comunitário sobre os recursos hídricos e define estratégias e normas que visam nomeadamente a preservação da rede hidrográfica e a valorização do meio hídrico, numa perspectiva com os diversos instrumentos de planeamento e gestão do território (Nunes, 2006).

O objectivo desta ferramenta é a protecção de águas superficiais, cursos de água transnacionais, águas costeiras e águas subterrâneas que (entre outros motivos) promove a sustentabilidade do uso da água com base na protecção a longo prazo da disponibilidade dos recursos hídricos. Esta Directiva exige a elaboração de planos de gestão das bacias hidrográficas para cada região hidrográfica, a fim de se atingir um bom estado ecológico e químico; e contribuirá para a atenuação dos efeitos das inundações. No entanto, a redução dos riscos de inundações não é um dos principais

objectivos desta directiva, que também não tem em conta as futuras alterações dos riscos de inundações em consequência das alterações climáticas. A prevenção e redução eficazes das inundações requerem, além da coordenação entre Estados-Membros, a cooperação com países terceiros. Tal exigência corresponde igualmente ao disposto na Directiva 2000/60/CE e aos princípios internacionais de gestão dos riscos de inundações, elaborados nomeadamente ao abrigo da Convenção das Nações Unidas relativa à Protecção e Utilização dos Cursos de Água Transfronteiras e dos Lagos Internacionais, aprovada pela **Decisão 95/308/CE do Conselho**, bem como nos subsequentes acordos relativos à sua aplicação.

Tendo em consideração os problemas e prejuízos que as cheias provocaram um pouco por toda a Europa, foi publicada a **Decisão 2001/792/CE**, de 23 de Outubro de 2001, que estabelece um mecanismo comunitário destinado a facilitar uma cooperação reforçada no quadro das intervenções de socorro da Protecção Civil, mobilizando o apoio e a assistência dos Estados-Membros em casos de emergência grave como as inundações. Neste âmbito, foi também publicado o **Regulamento n.º 2012/2002 do Conselho**, de 11 de Novembro de 2002, que institui o Fundo de Solidariedade da União Europeia, que permite conceder um auxílio financeiro rápido em caso de catástrofes de grandes proporções, nomeadamente em caso de cheia, para ajudar as populações, as zonas naturais, as regiões e os países afectados a regressarem a condições tão normais quanto possível. Contudo, o Fundo só pode intervir em operações de emergência e não nas fases que precedem uma emergência.

No âmbito europeu, foi também publicada a **Directiva 2007/60/CE** do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de Outubro de 2007, relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações, referindo mais uma vez que “*determinadas actividades humanas (como o aumento das aglomerações humanas e dos bens económicos nas planícies aluviais e a redução da retenção natural de água devido à utilização do solo) e as alterações climáticas contribuem para um aumento da probabilidade de ocorrência de inundações e do respectivo impacto negativo*”. Tem como objectivo reduzir e gerir o risco que as cheias provocam para a saúde humana, ambiente, infra-estruturas e propriedades. Na presente directiva os estados membros necessitam de efectuar uma avaliação preliminar para identificar as bacias hidrográficas e as áreas com risco de cheia. Para tais zonas irão precisar de desenvolver mapas de risco de cheia e depois

planos de gestão do risco de cheia vocacionados para a prevenção, protecção e preparação.

Na sequência desta Directiva comunitária, surgiu a nível nacional a **Resolução da Assembleia da República n.º 15/2008** de 21 de Abril, respeitante aos riscos de inundações. Aqui salienta-se a necessidade duma *“urgente avaliação preliminar das situações de risco de inundações em cada distrito, na Região Autónoma dos Açores e na Região Autónoma da Madeira, tendo por base as linhas de água com ocorrências graves (grandes danos patrimoniais) e muito graves (perda de vidas humanas) verificadas nos últimos 30 anos”*. Assim, propõem-se a elaboração de um relatório sobre as principais situações de risco de inundações, com a identificação das linhas de água problemáticas, de relatórios posteriores de actualização das situações de risco e de progresso da estratégia de prevenção. Com base nesta avaliação, pressupõem-se a elaboração de um Plano

Nacional de Redução do Risco de Inundações *“que estabeleça um conjunto de medidas nas áreas do planeamento, da prevenção e da resposta operacional às ocorrências; que garanta o estudo aprofundado do potencial de risco, com recurso às tecnologias e conhecimento científico existentes”*.

Actualmente, discute-se ainda ao nível da União Europeia a criação do “Flood Action Programme” que visa a protecção de vidas humanas e da saúde pública contra os efeitos adversos das cheias: proteger e melhorar a qualidade do ambiente, reduzir os danos provocados pelas cheias e atingir os objectivos da EU no que respeita ao desenvolvimento económico sustentável. Prevê-se que este programa inclua instrumentos legais que imponham a obrigação de procurar uma aproximação integrada e co-ordenada com o princípio da solidariedade e da responsabilidade partilhada.

ANEXO II - Apresentação e funcionamento do MiniDisk

O infiltrómetro do tipo MiniDisk (Figura 1) é constituído por duas câmaras separadas onde se introduz água. A câmara de cima serve para controlar a sucção desejada durante o ensaio, seleccionada de acordo com a velocidade de infiltração de água, associada ao tipo de solo (a sucção utilizada foi de 0,5 cm de modo a possibilitar leituras de variação de volume em tempo adequado). A câmara de baixo é graduada, apresentando o volume em mililitros, e é constituída por uma membrana metálica porosa, na parte inferior, que permite a passagem de água para o solo, a uma taxa determinada pela condutividade hidráulica.

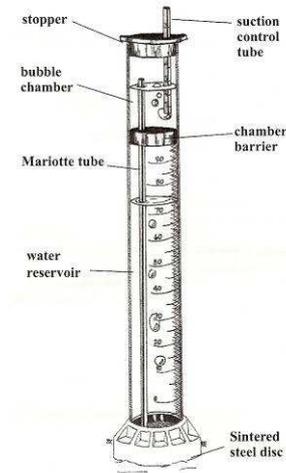


Figura 1 – Diagrama do infiltrómetro MiniDisk (Decagon Devices, 2007).

O cálculo da infiltração requer a determinação da infiltração acumulada *vs* tempo, de acordo com a seguinte expressão matemática:

$$I = C_1 t + C_2 t^{1/2}$$

Onde, C_1 ($m s^{-1}$) e C_2 ($m s^{-1/2}$) são parâmetros. O primeiro (C_1) está relacionado com a condutividade hidráulica, enquanto C_2 está associado à adsorptividade do solo. A condutividade hidráulica do solo (k) é calculada considerando a razão C_1/A , onde C_1 representa o declive da curva da infiltração acumulada *vs* a raiz quadrada do tempo, e A é o valor relacionado com o parâmetro de van Genuchten para um determinado tipo de solo, taxa de sucção utilizada durante o ensaio e raio da membrana do infiltrómetro. O parâmetro A pode ser calculado através das expressões seguidamente apresentadas:

$$A = \frac{11.65(n^{0.1} - 1) \exp[2.92(n - 1.9)\alpha h_o]}{(\alpha r_o)^{0.91}} \quad n \geq 1.9$$

$$A = \frac{11.65(n^{0.1} - 1) \exp[7.5(n - 1.9)\alpha h_o]}{(\alpha r_o)^{0.91}} \quad n < 1.9$$

Sendo,

n e α – parâmetros de van Genuchten (determinados a partir da tabela)

r_o – raio da membrana do MiniDisk (2,2 cm para o MiniDisk utilizado)

h_o - sucção aplicada no MiniDisk

Tabela 1 – Parâmetros de van Genuchten para as 12 classes de textura do solo e valores de A para membranas de MiniDisk com 2,2 cm de raio e diferentes valores de sucção (Decagon Devices, 2007).

Textura	α	n	h_o						
			0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
			A						
Arenosa	0,145	2,68	2,9	2,5	1,8	1,3	0,9	0,7	0,5
Franco-Arenosa	0,124	2,28	3,0	2,8	2,5	2,2	1,9	1,6	1,4
Areno-Franca	0,075	1,89	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,1	4,1
Franca	0,036	1,56	5,6	5,8	6,4	7,0	7,7	8,4	9,2
Limosa	0,016	1,37	8,1	8,3	8,9	9,5	10,1	10,8	11,5
Limosa-Franca	0,020	1,41	7,2	7,5	8,1	8,7	9,4	10,1	10,9
Areno-Argilo-Franca	0,059	1,48	3,3	3,6	4,3	5,2	6,3	7,6	9,1
Argilo-Franca	0,019	1,31	6,0	6,2	6,8	7,4	8,0	8,7	9,5
Limo-Argilo-Franca	0,010	1,23	8,1	8,3	8,7	9,1	9,6	10,1	10,6
Areno- Argilosa	0,027	1,23	3,4	3,6	4,2	4,8	5,6	6,3	7,2
Limo-Argilosa	0,005	1,09	6,2	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3
Argilosa	0,008	1,09	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,1	5,3

ANEXO III - Calibração do simulador de chuva

O LPM (Figura 2), utilizado na calibração do simulador de chuva, é um equipamento que mede o tamanho e a velocidade vertical das partículas de precipitação que atravessam um feixe de luz laser com 0,75 mm de espessura. O tamanho da área de detecção é aproximadamente de 46 cm². Todas as partículas que atravessam o feixe laser reduzem a intensidade transmitida, que é a amplitude do



Figura 2 – Distrómetro utilizado na calibração do simulador de chuva.

signal, para a medida do diâmetro de cada partícula. A velocidade vertical é derivada da duração do sinal que é usado na medida do diâmetro da partícula e a espessura do feixe laser. A classificação do tipo de precipitação é baseada no tamanho e na velocidade das partículas de chuva, medidos em intervalos de tempo de um minuto. O LPM determina o volume de todas as partículas, levando em conta a forma assimétrica das gotas com um diâmetro maior que 1 mm. A intensidade de precipitação é calculada, integrando o volume de todas as partículas individuais detectadas, num intervalo de tempo de 1 minuto. Devido ao seu elevado poder de detecção, de 0,001mm/h, o LPM pode registrar chuvadas de baixa intensidade (Duarte, 2008).

Os resultados proporcionados revelam variações da distribuição da precipitação no interior das parcelas, de acordo com a Figura 3.

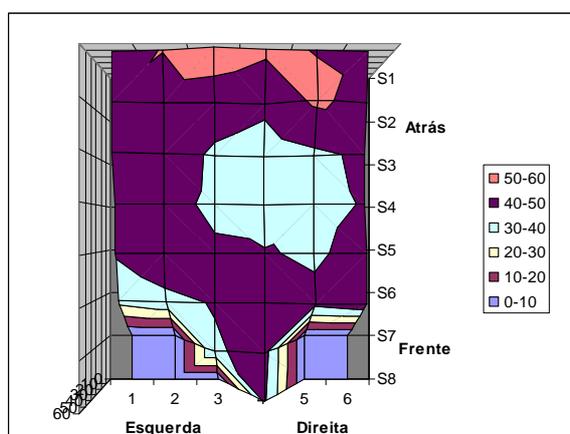


Figura 3 – Distribuição da intensidade de precipitação dentro da parcela de simulação de chuva.

De acordo com a Figura 2, observa-se que os valores mais elevados de precipitação ocorrem na parte de trás da parcela. Deste modo, fica atenuado o possível efeito da maior erosão provocada pelo impacto das gotas da chuva na escorrência superficial recolhida.

A partir dos dados obtidos com o LPM foi ainda possível efectuar a análise do diâmetro das gotas (Figura 4) e da respectiva velocidade terminal (Figura 5).

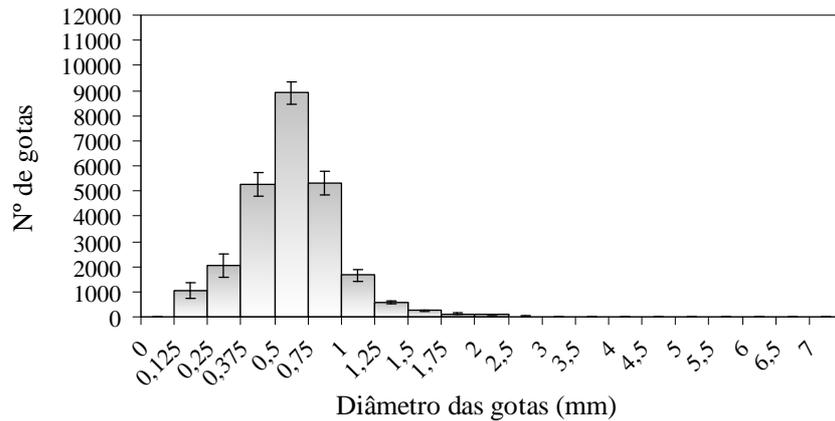


Figura 4 – Distribuição do número de gotas de chuva com diferentes dimensões, proporcionada pelo simulador de chuva.

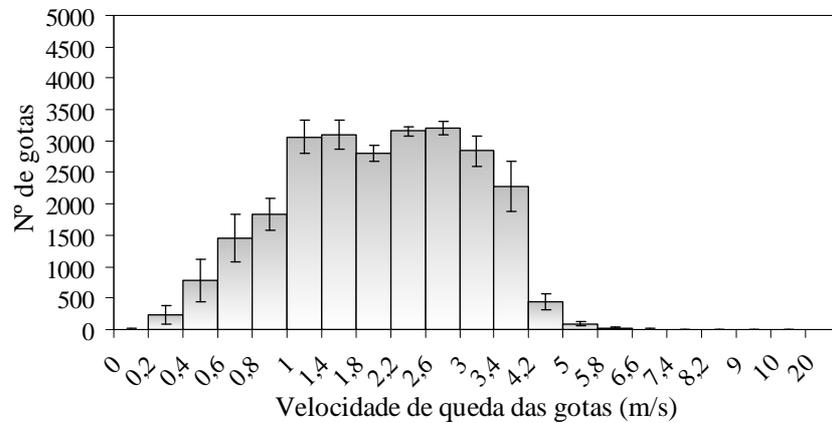


Figura 5 – Distribuição do número de gotas de chuva com diferentes dimensões, proporcionada pelo simulador de chuva.

ANEXO IV - Método para a determinação da capacidade de retenção de água

A capacidade de retenção de água é, geralmente, utilizada como medida da proporção de humidade que o solo pode reter quando, depois de saturado, se deixa a drenagem operar livremente. Aplicando ao solo húmido forças de extracção de água sucessivamente mais elevadas e determinando a percentagem de humidade que o solo retém contra cada uma das forças aplicadas, obtêm-se valores que permitem traçar curvas relacionando a tensão de humidade com o teor do solo em água. Tais curvas denominam-se curvas da tensão de humidade ou curvas do pF. O parâmetro pF representa o logaritmo da altura em centímetros da coluna de água que exerce pressão equivalente à força de retenção ou atracção do solo para a água (Costa, 1999).

A capacidade de campo é geralmente definida como o conteúdo hídrico do solo quando sujeito a uma pressão de 0,1 bar, que corresponde a um pF de 2 (Costa, 1999; Teijeiro, 2007).

Para a sua determinação utilizou-se um conjunto de membranas de pressão, segundo a técnica de Richards. O método consiste em aplicar uma determinada pressão (0,1 bar para a capacidade de campo (pF2) a uma amostra de solo previamente humedecida com água por capilaridade (no caso de amostras repelentes, foi necessário utilizar álcool para destruir a repelência), localizada dentro de um anel com um tecido poroso por baixo. A pressão é exercida por intermédio de um aparelho que consta essencialmente de uma câmara cilíndrica de material excepcionalmente resistente, a cuja base (onde existe um pequeno orifício de saída de água) se adapta uma membrana. Esta membrana especial suporta a pressão sem ruptura das películas aquosas que se estabelecem nos seus poros e, como tal, deixa-se atravessar pela água e não pelo ar que se introduz na câmara sob pressão. Colocando pequenas amostras de terra saturada de água sobre a membrana e desenvolvendo na câmara a pressão respectiva, a terra perde água, que passa através da membrana e é conduzida para o exterior pelo orifício da base da câmara, até ao momento em que a água retida se encontra em equilíbrio com a pressão aplicada (Costa, 1999).

Posteriormente determina-se o conteúdo de humidade por secagem a 105°C durante 24h, uma vez que o solo submetido a essa pressão não cede mais água. Os resultados

podem ser expressos em termos volúmicos multiplicando o conteúdo de humidade pelo valor da densidade aparente (Teijeiro, 2007).

ANEXO V – Balanço hidrológico

Tabela 2 – Balanço hidrológico realizado para a série climática 1941-1970.

Meses	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual
Ti (°C)	9,6	10,2	12,6	14,3	16,4	19,4	20,9	20,9	19,8	16,8	12,6	9,8	-
i	2,7	2,9	4,0	4,8	5,9	7,6	8,5	8,5	7,9	6,2	4,0	2,7	-
J (cm)	65,9												-
a	1,5												-
ETpo (cm/mês)	2,8	3,1	4,3	5,2	6,4	8,3	9,3	9,3	8,6	6,7	4,3	2,9	-
k	0,80	0,89	0,99	1,10	1,20	1,25	1,23	1,15	1,04	0,93	0,83	0,78	-
ETp (cm/mês)	2,3	2,8	4,3	5,8	7,7	10,4	11,5	10,7	8,9	6,2	3,6	2,3	-
ETp (mm/mês)	22,8	27,8	42,7	57,5	77,3	104,1	114,8	107,3	89,4	62,2	35,8	22,9	764,6
P (mm)	125,6	110,3	111,9	70,8	68,9	39,2	8,5	15,1	42,5	81,2	114,8	115,7	904,5
P-Etp (mm)	102,8	82,5	69,2	13,3	-8,4	-64,9	-106,3	-92,2	-46,9	19,0	79,0	92,8	-
L (mm)	-	-	-	-	-8,4	-73,4	-179,7	-271,9	-318,8	-	-	-	-
nu (mm)	100,0												-
L/nu	-	-	-	-	-0,1	-0,7	-1,8	-2,7	-3,2	-	-	-	-
Sso (mm)	100,0	100,0	100,0	100,0	91,9	48,0	16,6	6,6	4,1	23,1	100,0	100,0	-
ΔSso (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	-8,1	-43,9	-31,4	-10,0	-2,5	19,0	76,9	0,0	-
ETe (mm)	22,8	27,8	42,7	57,5	77,0	83,1	39,9	25,1	45,0	62,2	35,8	22,9	541,6
SH (mm)	102,8	82,5	69,2	13,3	-	-	-	-	-	0,0	2,2	92,8	362,9
DH (mm)	-	-	-	-	0,3	21,0	74,9	82,3	44,4	-	-	-	222,9

Ti – temperatura média mensal, i – índice de calor mensal, J – índice de calor anual, ETpo – evapotranspiração potencial, num local do equador (latitude 0, 12 horas de luz por dia), k – factor de correcção da duração mensal de insolação, ETp – evapotranspiração potencial ajustada ao local em estudo, P – precipitação total, L – perda potencial de água, nu – capacidade de água utilizável, Sso – armazenamento de água no solo, ETe – evapotranspiração efectiva, SH – superavit hídrico, DH – défice hídrico.

Tabela 3 – Balanço hidrológico realizado para a série climática 1971-2000.

Meses	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual
Ti (°C)	9,6	10,8	12,3	14,1	15,9	19,3	21,3	21,2	20,1	16,7	12,9	10,6	-
i	2,7	3,2	3,9	4,7	5,7	7,6	8,8	8,7	8,1	6,1	4,1	3,1	-
J (cm)	66,6												-
a	1,5												-
ETpo (cm/mês)	2,8	3,4	4,2	5,1	6,1	8,3	9,6	9,5	8,8	6,6	4,5	3,3	-
k	0,80	0,89	0,99	1,10	1,20	1,25	1,23	1,15	1,04	0,93	0,83	0,78	-
ETp (cm/mês)	2,3	3,0	4,1	5,6	7,4	10,3	11,8	11,0	9,1	6,2	3,7	2,6	-
ETp (mm/mês)	22,8	30,3	41,1	56,3	73,8	103,3	118,2	109,7	91,5	61,6	37,1	25,8	771,4
P (mm)	116,3	106,5	63,5	80,7	79,0	38,9	10,9	14,9	51,9	100,4	112,4	125,0	900,4
P-Etp (mm)	93,5	76,2	22,4	24,4	5,2	-64,4	-107,3	-94,8	-39,6	38,8	75,3	99,2	-
L (mm)	-	-	-	-	-	-64,4	-171,7	-266,5	-306,1	-	-	-	-
nu (mm)	100,0												-
L/nu	-	-	-	-	-	-0,6	-1,7	-2,7	-3,1	-	-	-	-
Sso (mm)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	52,5	18,0	7,0	4,7	43,5	100,0	100,0	-
ΔSso (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-47,5	-34,6	-11,0	-2,3	38,8	56,5	0,0	-
ETe (mm)	22,8	30,3	41,1	56,3	79,0	86,4	45,5	25,9	54,2	61,6	37,1	25,8	565,9
SH (mm)	93,5	76,2	22,4	24,4	5,2	-	-	-	-	0,0	18,8	99,2	339,7
DH (mm)	-	-	-	-	-	16,9	72,7	83,8	37,3	-	-	-	210,7

Ti – temperatura média mensal, i – índice de calor mensal, J – índice de calor anual, ETpo – evapotranspiração potencial, num local do equador (latitude 0, 12 horas de luz por dia), k – factor de correcção da duração mensal de insolação, ETp – evapotranspiração potencial ajustada ao local em estudo, P – precipitação total, L – perda potencial de água, nu – capacidade de água utilizável, Sso – armazenamento de água no solo, ETe – evapotranspiração efectiva, SH – superavit hídrico, DH – défice hídrico.

ANEXO VI – Correlações estatísticas

Tabela 4 – Coeficientes de correlação de Pearson entre as características físico-químicas do solo na camada superficial (0-2 cm).

		Argila	Limo	Areia Fina	Areia Grossa	Densidade	MO	pH H2O	pH KCl	Hmd M	Rpl M	Kh M	pF0	pF2
Argila	Pearson Correlation	1.000	.239	-.288	-.414	.564	-.670	-.178	-.139	-.096	.603	-.656	-.321	-.275
	Sig. (2-tailed)	.	.433	.341	.160	.045	.012	.560	.650	.754	.029	.015	.284	.363
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Limo	Pearson Correlation	.239	1.000	-.182	-.634	.221	.126	.465	.457	.597	-.284	-.025	.189	.329
	Sig. (2-tailed)	.433	.	.552	.020	.468	.682	.109	.117	.031	.347	.935	.536	.273
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Areia Fina	Pearson Correlation	-.288	-.182	1.000	-.503	-.019	.283	-.007	.011	-.244	-.086	.390	.102	-.120
	Sig. (2-tailed)	.341	.552	.	.079	.950	.348	.981	.972	.421	.780	.188	.741	.696
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Areia Grossa	Pearson Correlation	-.414	-.634	-.503	1.000	-.376	.013	-.220	-.239	-.170	-.049	.027	-.071	-.001
	Sig. (2-tailed)	.160	.020	.079	.	.205	.967	.470	.433	.579	.875	.931	.819	.997
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Densidade	Pearson Correlation	.564	.221	-.019	-.376	1.000	-.716	-.072	.015	-.270	.262	-.308	-.588	-.517
	Sig. (2-tailed)	.045	.468	.950	.205	.	.006	.816	.961	.373	.388	.306	.035	.071
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
MO	Pearson Correlation	-.670	.126	.283	.013	-.716	1.000	.361	.366	.455	-.506	.692	.609	.703
	Sig. (2-tailed)	.012	.682	.348	.967	.006	.	.225	.219	.118	.078	.009	.027	.007
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
pH H2O	Pearson Correlation	-.178	.465	-.007	-.220	-.072	.361	1.000	.938	.809	-.577	.396	.426	.651
	Sig. (2-tailed)	.560	.109	.981	.470	.816	.225	.	.000	.001	.039	.181	.146	.016
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13

		Argila	Limo	Areia F.	Areia G.	Densidade	MO	pH H2O	pH KCl	Hmd M	Rpl M	Kh M	pF0	pF2
pH KCl	Pearson Correlation	-.139	.457	.011	-.239	.015	.366	.938	1.000	.760	-.625	.413	.335	.562
	Sig. (2-tailed)	.650	.117	.972	.433	.961	.219	.000	.	.003	.022	.161	.264	.046
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Hmd M	Pearson Correlation	-.096	.597	-.244	-.170	-.270	.455	.809	.760	1.000	-.585	.280	.367	.672
	Sig. (2-tailed)	.754	.031	.421	.579	.373	.118	.001	.003	.	.036	.353	.217	.012
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Rpl M	Pearson Correlation	.603	-.284	-.086	-.049	.262	-.506	-.577	-.625	-.585	1.000	-.339	-.108	-.391
	Sig. (2-tailed)	.029	.347	.780	.875	.388	.078	.039	.022	.036	.	.258	.725	.187
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Kh M	Pearson Correlation	-.656	-.025	.390	.027	-.308	.692	.396	.413	.280	-.339	1.000	.620	.505
	Sig. (2-tailed)	.015	.935	.188	.931	.306	.009	.181	.161	.353	.258	.	.024	.078
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
pF0	Pearson Correlation	-.321	.189	.102	-.071	-.588	.609	.426	.335	.367	-.108	.620	1.000	.769
	Sig. (2-tailed)	.284	.536	.741	.819	.035	.027	.146	.264	.217	.725	.024	.	.002
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
pF2	Pearson Correlation	-.275	.329	-.120	-.001	-.517	.703	.651	.562	.672	-.391	.505	.769	1.000
	Sig. (2-tailed)	.363	.273	.696	.997	.071	.007	.016	.046	.012	.187	.078	.002	.
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13

Sendo,

MO – matéria orgânica

Hmd M – humidade avaliada na campanha de monitorização de Maio

Rpl M – hidrofobia avaliada na campanha de monitorização de Maio

Kh M – condutividade hidráulica avaliada na campanha de monitorização de Maio

Tabela 5 – Coeficientes de correlação de Pearson entre as características físico-químicas do solo na camada entre os 5-7 cm).

		Argila	Limo	Areia Fina	Areia Grossa	Densidade	MO	pH H2O	pH KCl	Hmd M	Rpl M	pF0	pF2
Argila	Pearson Correlation	1.000	.270	-.177	-.594	.418	-.762	-.389	-.407	-.373	.706	-.102	-.092
	Sig. (2-tailed)	.	.373	.563	.032	.156	.002	.189	.168	.209	.007	.739	.766
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Limo	Pearson Correlation	.270	1.000	-.195	-.468	-.039	.022	.433	.447	.310	-.288	-.033	.059
	Sig. (2-tailed)	.373	.	.524	.107	.899	.944	.139	.126	.302	.340	.916	.847
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Areia Fina	Pearson Correlation	-.177	-.195	1.000	-.564	-.011	.155	.016	.049	-.449	-.020	-.066	-.513
	Sig. (2-tailed)	.563	.524	.	.045	.971	.614	.959	.874	.124	.949	.830	.073
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Areia Grossa	Pearson Correlation	-.594	-.468	-.564	1.000	-.235	.334	.027	.011	.427	-.286	.126	.420
	Sig. (2-tailed)	.032	.107	.045	.	.439	.265	.929	.972	.146	.343	.681	.153
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Densidade	Pearson Correlation	.418	-.039	-.011	-.235	1.000	-.546	.085	-.056	-.140	.219	-.477	-.365
	Sig. (2-tailed)	.156	.899	.971	.439	.	.054	.783	.856	.648	.473	.099	.221
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
MO	Pearson Correlation	-.762	.022	.155	.334	-.546	1.000	.430	.471	.578	-.518	.546	.345
	Sig. (2-tailed)	.002	.944	.614	.265	.054	.	.143	.104	.038	.070	.053	.248
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
pH H2O	Pearson Correlation	-.389	.433	.016	.027	.085	.430	1.000	.948	.411	-.592	.117	.181
	Sig. (2-tailed)	.189	.139	.959	.929	.783	.143	.	.000	.163	.033	.704	.554
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13

		Argila	Limo	Areia F.	Areia G.	Densidade	MO	pH H2O	pH KCl	Hmd M	Rpl M	pF0	pF2
pH KCl	Pearson Correlation	-.407	.447	.049	.011	-.056	.471	.948	1.000	.465	-.685	.066	.106
	Sig. (2-tailed)	.168	.126	.874	.972	.856	.104	.000	.	.109	.010	.830	.730
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Hmd M	Pearson Correlation	-.373	.310	-.449	.427	-.140	.578	.411	.465	1.000	-.606	.252	.368
	Sig. (2-tailed)	.209	.302	.124	.146	.648	.038	.163	.109	.	.028	.406	.215
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Rpl M	Pearson Correlation	.706	-.288	-.020	-.286	.219	-.518	-.592	-.685	-.606	1.000	.187	.014
	Sig. (2-tailed)	.007	.340	.949	.343	.473	.070	.033	.010	.028	.	.540	.963
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
pF0	Pearson Correlation	-.102	-.033	-.066	.126	-.477	.546	.117	.066	.252	.187	1.000	.737
	Sig. (2-tailed)	.739	.916	.830	.681	.099	.053	.704	.830	.406	.540	.	.004
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
pF2	Pearson Correlation	-.092	.059	-.513	.420	-.365	.345	.181	.106	.368	.014	.737	1.000
	Sig. (2-tailed)	.766	.847	.073	.153	.221	.248	.554	.730	.215	.963	.004	.
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13

Sendo,

MO – matéria orgânica

Hmd M – humidade avaliada na campanha de monitorização de Maio

Rpl M – hidrofobia avaliada na campanha de monitorização de Maio

Kh M – condutividade hidráulica avaliada na campanha de monitorização de Maio

Tabela 6 – Coeficientes de correlação de Pearson entre as características físico-químicas do solo na camada entre os 15 - 17 cm.

		Argila	Limo	Areia Fina	Areia Grossa	Densidade	MO	pH H2O	pH KCl	Hmd M	RpIM	pF0	pF2
Argila	Pearson Correlation	1.000	.416	-.056	-.888	.488	-.556	-.222	-.178	-.102	.	-.556	-.444
	Sig. (2-tailed)	.	.158	.855	.000	.090	.048	.466	.560	.741	.	.049	.128
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Limo	Pearson Correlation	.416	1.000	-.259	-.458	.001	.109	.521	.717	.608	.	-.090	-.023
	Sig. (2-tailed)	.158	.	.394	.115	.997	.722	.068	.006	.028	.	.770	.939
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Areia Fina	Pearson Correlation	-.056	-.259	1.000	-.356	.238	-.250	-.264	-.268	-.591	.	-.070	-.036
	Sig. (2-tailed)	.855	.394	.	.232	.433	.410	.384	.377	.033	.	.821	.907
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Areia Grossa	Pearson Correlation	-.888	-.458	-.356	1.000	-.520	.549	.190	.105	.215	.	.508	.389
	Sig. (2-tailed)	.000	.115	.232	.	.068	.052	.534	.733	.480	.	.076	.189
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Densidade	Pearson Correlation	.488	.001	.238	-.520	1.000	-.833	-.342	-.325	-.427	.	-.779	-.688
	Sig. (2-tailed)	.090	.997	.433	.068	.	.000	.252	.279	.146	.	.002	.009
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
MO	Pearson Correlation	-.556	.109	-.250	.549	-.833	1.000	.476	.516	.684	.	.812	.754
	Sig. (2-tailed)	.048	.722	.410	.052	.000	.	.100	.071	.010	.	.001	.003
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
pH H2O	Pearson Correlation	-.222	.521	-.264	.190	-.342	.476	1.000	.889	.713	.	.337	.418
	Sig. (2-tailed)	.466	.068	.384	.534	.252	.100	.	.000	.006	.	.260	.155
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
pH KCl	Pearson Correlation	-.178	.717	-.268	.105	-.325	.516	.889	1.000	.796	.	.333	.418
	Sig. (2-tailed)	.560	.006	.377	.733	.279	.071	.000	.	.001	.	.266	.156
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13

		Argila	Limo	Areia Fina	Areia Grossa	Densidade	MO	pH H2O	pH KCl	Hmd M	RplM	pF0	pF2
Hmd M	Pearson Correlation	-.102	.608	-.591	.215	-.427	.684	.713	.796	1.000	.	.338	.371
	Sig. (2-tailed)	.741	.028	.033	.480	.146	.010	.006	.001	.	.	.258	.212
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Rpl M	Pearson Correlation	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	Sig. (2-tailed)	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
pF0	Pearson Correlation	-.556	-.090	-.070	.508	-.779	.812	.337	.333	.338	.	1.000	.948
	Sig. (2-tailed)	.049	.770	.821	.076	.002	.001	.260	.266	.258	.	.	.000
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
pF2	Pearson Correlation	-.444	-.023	-.036	.389	-.688	.754	.418	.418	.371	.	.948	1.000
	Sig. (2-tailed)	.128	.939	.907	.189	.009	.003	.155	.156	.212	.	.000	.
	N	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13

Sendo,

MO – matéria orgânica

Hmd M – humidade avaliada na campanha de monitorização de Maio

Rpl M – hidrofobia avaliada na campanha de monitorização de Maio

Kh M – condutividade hidráulica avaliada na campanha de monitorização de Maio