

## **“Aplicação do SIG na avaliação dos impactes hidrológicos das alterações do uso do solo em bacias hidrográficas periurbanas”**

### **"GIS application to assess hydrological impacts of land use change in periurban catchments"**

**CARVALHO**, Lúdia Santos<sup>1</sup>, **FERREIRA**, Carla Sofia Santos<sup>1,2</sup> & **FERREIRA**, António José Dinis<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Centro de Estudos de Recursos Naturais Ambiente e Sociedade, Escola Superior Agrária de Coimbra, Bencanta, 3045-601 Coimbra, email: lidiacarvalho\_@hotmail.com; aferreira@esac.pt, telf.: 239802940, fax: 239802979*

<sup>2</sup> *Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM), Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, email: carla.ssf@gmail.com, telf.: 239802940, fax: 239802979*

#### **Resumo**

A ocupação das áreas periurbanas promove alterações no uso do solo que afetam os processos hidrológicos. A expansão das áreas impermeáveis, decorrentes da urbanização, promove o aumento do escoamento superficial, podendo incrementar o risco de cheia urbana. Neste trabalho pretende-se avaliar os impactes das alterações do uso do solo na hidrologia superficial de uma área periurbana de Coimbra. Para tal, recorreu-se à utilização dos sistemas de informação geográfica (SIG), para organizar e analisar informação biofísica e dados hidrológicos recolhidos no campo. O recurso ao SIG permitiu examinar a paisagem e o seu impacte na transferência do escoamento superficial dentro da bacia. O SIG representa uma importante ferramenta de apoio que deve ser considerada para o planeamento de novas áreas urbanas com vista à minimização do risco de cheia.

**Palavras-chave:** Uso do solo, urbanização, escoamento superficial, conectividade da paisagem, ArcGIS.

#### **Abstract**

Impermeable areas expansion, resulting from urbanization process, promotes increased runoff and may lead to enhanced urban flood hazard. This paper aims to assess land use change impacts in a periurban area of Coimbra, on surface hydrology. To this end, geographical information systems (GIS) were used in order to organize and analyze biophysical information and field data results. GIS allowed landscape units characterization and flowing patterns inside the catchment. GIS represents an important supporting tool which should be considered for new urban areas planning, in order to minimize flood risk.

**Key-words:** Land use, urbanization, runoff, landscape connectivity, ArcGIS.

## **1. Introdução**

A pressão exercida sobre o solo decorrente do aumento da população nas cidades tem-se traduzido na ocupação das áreas periurbanas. Esta ocupação provoca alterações no uso do solo, que se refletem no regime de vazões, nomeadamente no aumento e velocidade do escoamento direto. Contudo, a magnitude destas alterações é influenciada por diversos parâmetros, nomeadamente a geologia, o clima, as propriedades do solo, bem como a dimensão e arranjo espacial das áreas impermeáveis (KONRAD & BOOTH, 2005).

Diferentes características do solo, aliadas ao padrão de utilização, promovem uma heterogeneidade paisagística que se pode traduzir em locais potenciais de geração de escoamento superficial ou de infiltração de água. Este arranjo espacial afeta assim a transferência e conectividade dos fluxos de água ao longo das encostas, determinando a resposta hidrológica das bacias. Contudo, apesar dos inúmeros estudos publicados desde a década de 60, apenas recentemente se começou a perceber a importância da conectividade da paisagem nos processos hidrológicos, representando assim um desafio para a compreensão da hidrologia urbana. O estudo do arranjo paisagístico dos usos e propriedades do solo é de extrema relevância e deve ser considerado no âmbito do ordenamento do território e gestão dos recursos hídricos, nomeadamente para minimizar o impacto de eventos hidrológicos extremos nas populações.

No sentido de melhorar a compreensão dos impactos hidrológicos resultantes das alterações do uso do solo em bacias hidrográficas periurbanas, tem vindo a ser desenvolvido um estudo na Ribeira dos Covões, localizada nas imediações do centro da cidade de Coimbra. Este estudo considera uma metodologia abrangente de recolha e análise de dados hidrológicos, baseada na realização de ensaios de campo e na recolha de dados provenientes de uma rede de monitorização instalada. O trabalho aqui apresentado faz parte do referido estudo, e tem como objetivos a utilização do SIG na: 1) caracterização biofísica da área, 2) interpolação espacial de propriedades do solo determinadas em campo, e 3) análise dos fluxos de água e sua transferência ao longo da bacia hidrográfica. Apesar de ser ainda um estudo preliminar, este trabalho procura discutir a importância do SIG na avaliação da conectividade da paisagem e sua influência nos processos hidrológicos, fundamental para o ordenamento do território e planeamento urbano.

## **2. Metodologia utilizada**

### **2.1. Caracterização biofísica**

As diferentes ocupações do solo foram obtidas a partir da *Corine Land Cover* de 2006 e através da disponibilização da Carta de Ocupação do solo (COS) de 2007, com resolução de 5x5m, pelo Instituto Geográfico Português (IGP). O Modelo numérico topográfico (MNT) referente ao ano 2007, adquirido ao IGP apresenta para a área de estudo a localização dos edifícios, muros, estradas, caminhos, pavimentos (que incluem passeios, logradouros e estacionamentos) e zonas de lazer, jardinadas, agrícolas e florestais. Toda esta informação foi separada em diferentes *layers* no software ArcGIS 10. Esta informação foi atualizada para os anos 2009, 2011 e 2012 com base nas fotografias aéreas disponibilizadas no Google Earth. Nesta aplicação, criaram-se polígonos referentes às mudanças que ocorreram na bacia hidrográfica ao longo destes anos. Devido à pouca

resolução de algumas fotografias (falta de nitidez ao aplicar o zoom), principalmente dos anos de 2011 e 2012, utilizou-se o modo *Street View* para ultrapassar o problema. Os diferentes tipos de superfícies urbanas foram assim desenhados/corrigidos e classificados em diferentes *layers* no Google Earth. As *layers* criadas com diferentes tipos de informação foram posteriormente exportados para ArcGIS. A informação exportada tem associado o sistema de coordenadas GCS\_WGS\_1984, convertido no ArcGIS para ETRS\_1989\_Portugal\_TM06, assumido como base para todos os dados matriciais utilizados, através da ferramenta "*Projections and Transformations*" do ArcMap.

No ArcGIS, as diferentes *layers* informativas foram agrupadas pelas tipologias de áreas impermeáveis, permeáveis e semipermeáveis para os diferentes anos. A tipologia de áreas impermeáveis é constituída pelas *layers* de edifícios, estradas, muros e pavimentos. Por sua vez, os caminhos, zonas de lazer, jardinadas, agrícolas e florestais, nas quais se incluem as zonas desflorestadas, foram classificadas como áreas permeáveis. As áreas semipermeáveis englobam zonas compactadas, nomeadamente estacionamento em terra, campos desportivos sintéticos e zonas de lazer revestidas com pavimento semipermeável.

## **2.2. Conectividade hidrológica**

Para os diferentes locais de monitorização dos caudais das linhas de água, no âmbito da rede hidrológica instalada, foram delimitadas as suas áreas de contribuição, a partir da determinação da direção do escoamento, com base no modelo digital terreno (MDT), recorrendo à ferramenta "*Hydrology*" do ArcMap.

Com o objetivo de determinar a conectividade da paisagem, sobrepôs-se a informação classificada em áreas impermeáveis, permeáveis e semipermeáveis com o MDT, no software ArcScene, de modo a construir o perfil em 3D. Para mapear a conectividade da paisagem, seguiu-se a metodologia de Roy e Shuster (2009), que considera que a continuidade dos fluxos de água provenientes das áreas impermeáveis é quebrada ao atingir as zonas permeáveis localizadas a jusante. Nesta primeira fase do trabalho, para o cálculo da conectividade da paisagem assumiram-se três simplificações: 1) conectividade apenas em período seco (ignorando as áreas saturadas em período húmido), 2) não ter em conta a capacidade de infiltração do solo, que afeta a geração de escoamento Hortoniano e, 3) não considerar a rede de drenagem urbana.

## **2.3. Análise espacial de dados**

Na monitorização hidrológica realizada no âmbito do projeto, foram efetuadas nove campanhas de amostragem para determinação da repelência, humidade e capacidade de infiltração dos solos, realizadas em 31 locais representativos de diversos usos e litologias. A repelência foi avaliada em superfície (0 cm) e à profundidade de 2 e 5 cm através da técnica de concentração da gota de etanol, que consiste em aplicar ao solo 15 gotas de água pura, seguidas de gotas de concentração progressivamente maiores de etanol até que 8 das 15 gotas sejam absorvidas num espaço de 5 segundos. Quando as gotas de água se infiltravam dentro dos 5 segundos o solo era considerado hidrofílico. As concentrações de etanol usadas foram de 0%, 3%, 5%, 18%, 24% e 36% em volume. Estas

percentagens de etanol utilizadas originaram as seguintes classes de repelência: baixa (3% e 5%), moderada (8,5% e 13%), severa (18% e 24%) e extrema (36%) (DOERR *et al.*, 1998). O teor de humidade foi determinado na camada superficial do solo (0-10cm), pelo método termogravimétrico (105°C). A capacidade de infiltração foi medida à superfície do solo, com recurso ao infiltrómetro de tensão MiniDisk, com membrana de 4,5 cm de diâmetro e tensão aplicada de -3,0cm (DECAGON, 2007). Os locais monitorizados foram georreferenciados com GPS e a informação transferida para ArcMap.

Os resultados obtidos em campo para as diferentes propriedades do solo foram representados espacialmente, através da sua interpolação pelo método de Polígonos de Thiessen, que desenha polígonos que contêm apenas uma característica específica. Qualquer ponto dentro do polígono de Thiessen está mais próximo do ponto associado do que qualquer outro ponto característico da propriedade em causa (DONG, 2008). A determinação dos polígonos de Thiessen foi obtida a partir da ferramenta específica disponível na extensão "*Spatial Analyst Tools*" do ArcMap. Apesar de este não ser um método muito robusto, foi utilizado apenas para dar uma ideia espacial dos valores das variáveis determinadas, uma vez que a extrapolação espacial dos dados não teve em consideração o mapa de uso do solo.

A rede de monitorização constituída por 5 udógrafos e 9 sensores de nível de água foi instalada em várias linhas de água, e fornece dados em contínuo da bacia e de diversas áreas de contribuição. As áreas de contribuição monitorizadas apresentam diferentes características, relacionadas, nomeadamente, com diferentes litologias e usos do solo.

### **3. Resultados e discussão**

#### **3.1. Caracterização biofísica da área de estudo**

Devido à sua proximidade ao centro da cidade de Coimbra (Figura 1), a Ribeira dos Covões (615ha) tem sido sujeita a profundas alterações no uso do solo, associadas ao aumento populacional de 2500 para 7300 habitantes, entre 1961 e 2011 (INE, 2014). Esta ocupação submeteu a bacia, de características inicialmente rurais (anterior a 1973), a um processo de urbanização descontínua e posterior consolidação urbana (após 1993), que se traduziu numa redução das áreas agrícolas, de 50% para 9%, e um aumento das áreas urbanas de 4% para 27%, entre 1958 e 2007 (PATO, 2007). Em 2007, as áreas florestais e urbanas representavam 62% e 27% respetivamente, da área de estudo (Figura 2).

(inserir aqui figuras 1 e 2)

A área de estudo é dominada por calcários e arenitos, associados a solos geralmente profundos, localizados a altitude inferior a 210m (Figura 3). A rede de drenagem desenvolve-se no sentido S-N, sendo constituída por um curso de água do tipo perene e uma série de linhas de água com regimes de escoamento efémero e temporário (Figura 4). Nas áreas urbanas, o sistema separativo de recolha e drenagem de águas encaminha as águas residuais para uma estação de tratamento localizada a jusante da bacia, e descarrega as águas pluviais nas linhas de água.

(inserir aqui figuras 3 e 4)

Tendo em consideração os recentes projetos de urbanização, as superfícies impermeáveis aumentaram de 11,6% para 13,4% entre 2007 e 2012 (figura 5). O maior aumento ocorreu entre os anos de 2009 e 2011, como resultado da construção do parque tecnológico (Iparque) (0,4%) e da Variante Sul de Coimbra do IC2 (1%).  
(inserir aqui figura 5)

### **3.2. Análise espacial dos fluxos de água**

Das oito secções de linhas de água monitorizadas na Ribeira dos Covões (ESAC) apenas o Espírito Santo, Quinta, Iparque e Ribeiro da Póvoa se localizam nas zonas de arenitos. A área de contribuição dos Covões, para além de arenitos, assenta maioritariamente em calcários. As restantes áreas de contribuição localizam-se totalmente sob calcários (Figura 6).

(inserir aqui figura 6)

A área de contribuição Drable, localizada a NW da bacia, é caracterizada por apresentar menor área de superfícies impermeáveis (1% em 2007 e 1,1% em 2012), por oposição ao Porto Bordalo que tem a maior área impermeável (9,9% em 2007 e 10,3% em 2012) (tabela I).

(inserir aqui tabela I)

A conectividade da paisagem é de extrema importância para a transferência de escoamento superficial. Ao propagar-se ao longo da encosta, o escoamento vai aumentando podendo atingir em quantidades consideráveis as zonas urbanas, elevando assim a possibilidade de ocorrência de cheia. No entanto, ao longo do seu percurso, o escoamento pode encontrar diversas barreiras físicas, como muros e bacias de retenção, que impedem a transmissão do escoamento. Estes resultados são ainda muito teóricos visto que as simplificações feitas por ainda estarmos na primeira fase do trabalho culminaram no facto de a conectividade hidrológica apenas ser obtida por análise visual no ArcScene. Para esta análise visual apenas se considerou que, se não houver barreiras físicas (ex., casas, muros) que impeçam o trajeto da água, ela continuará pela encosta acompanhando o declive.

### **3.3. Propriedades do solo**

A repelência do solo à água foi observada ao longo do ano, cobrindo extensas áreas durante o verão (50% da bacia), com grande severidade, e retraindo durante o inverno (permanecendo apenas em alguns solos florestais, cobrindo 20% da bacia) (Figura 7). A repelência afeta de forma mais severa e persistente eucaliptais e pinhais, localizados principalmente na zona de arenitos, uma vez que estas espécies libertam grandes quantidades de compostos hidrofóbicos, tais como resinas, ceras e óleos aromáticos (DOERR *et al.*, 1998; JORDAN *et al.*, 2008).

Tal como esperado a humidade do solo varia em função das condições meteorológicas antecedentes. No final do verão (30/09/2010) a humidade da bacia foi geralmente inferior a 20%, aumentando durante a época de chuva, atingindo mesmo a saturação após eventos mais severos, subsequentes a períodos de chuva mais frequentes, tal como

observado em Janeiro de 2011 (Figura 8). A saturação do solo foi identificada em locais de fundo de vale e encostas com solo pouco profundo. Os solos calcários apresentaram teores de humidade geralmente superiores aos solos areníticos, devido à sua origem margosa (EASTON *et al.*, 2007; HARDIE *et al.*, 2011).

De um modo geral, a capacidade de infiltração da matriz do solo é reduzida (Figura 9), atingindo valores mais elevados (10-15 mm h<sup>-1</sup>) em locais isolados. Em período seco, os solos florestais apresentam uma reduzida capacidade de infiltração devido ao efeito da repelência. Contudo, durante o período húmido, a repelência é drasticamente reduzida, favorecendo o aumento da capacidade de infiltração. Por outro lado, os solos urbanos e agrícolas, maioritariamente hidrofílicos, apresentaram menor capacidade de infiltração em período húmido, resultante do aumento da humidade. A menor capacidade de infiltração dos solos urbanos pode dever-se à sua compactação (OLSON *et al.*, 2013). Tendo em consideração a localização das zonas urbanas (figura 4) e a variabilidade espacio-temporal das propriedades hidrológicas do solo, é patente a suscetibilidade de algumas destas zonas para receberem escoamento Hortoniano proveniente dos solos florestais hidrofóbicos, em período seco, e/ou escoamento por saturação durante períodos extremamente húmidos.

(inserir aqui figuras 7,8 e 9)

#### **4. Conclusão**

A crescente urbanização das zonas periurbanas, registado nas últimas décadas, envolve consideráveis alterações no uso do solo que afetam as propriedades do solo e a resposta hidrológica das bacias. Neste sentido, o ordenamento do território deve considerar a importância da preservação e manutenção de locais com elevada capacidade de infiltração de água, particularmente as áreas florestais. O planeamento de novas áreas urbanas deve ainda assegurar a manutenção de diferentes usos do solo, de modo a reduzir a conectividade dos fluxos hidrológicos e assim diminuir o risco de cheia. O conhecimento relativo à variabilidade espacial e temporal das diversas características biofísicas das bacias e dos processos de geração de escoamento deverão ser considerados no planeamento das diferentes unidades da paisagem, nomeadamente no que respeita a localização e extensão dos diferentes usos do solo. A gestão de toda esta informação através do SIG permitirá investigar a resposta hidrológica associada a diferentes cenários de alteração do uso do solo, apoiando assim a tomada de decisões relativas ao planeamento.

#### **Agradecimentos**

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto FRURB: Gestão do risco de cheia em áreas urbanas no contexto das alterações globais (PTDC/AUR-URB/123089/2010), financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, na sua componente OE, e co-financiado pelo COMPETE, na sua componente FEDER.

## Referências Bibliográficas

- DECAGON, (2007). Mini-infiltrimeter manual, Version 4. Decagon Devices Inc., Pullman,WA.
- Doerr, Stefan *et al.* (1998). –“Spatial variability of soil hydrophobicity in fire-prone eucalyptus and pine forests, Portugal”. **Soil Science** Vol.163, 313–324.
- DONG, Pinliang (2008). –“Generating and updating multiplicatively weighted Voronoi diagrams for point, line and polygon features in Gis”. **Computers & Geosciences**, 34, 411-421.
- EASTON, Zachary *et al.* (2007). –“Hydrologic assessment of an urban variable source watershed in the Northeast United States”. **Water Resources Research**. Vol.43, W03413.
- HARDIE, Marcus *et al.* (2011). –“Effect of antecedent soil moisture on preferential flow in a texture-contrast soil”. **Journal of Hydrology**, Vol.398, 191–201.
- INE: Instituto Nacional de Estatística, (2011) – XV Recenseamento Geral da População e V Recenseamento Geral da habitação. Lisboa: Instituto Nacional de Estatística.
- JORDÁN, Antonio *et al.* (2008). –“Heterogeneity in soil hydrological response from different land cover types in southern Spain”. **Catena**. Vol.74, 137–143.
- KONRAD, Christopher & BOOTH, Derek (2005). – “Hydrologic changes in urban streams and their ecological significance. In: Effects of urbanization on stream ecosystems”. **American Fisheries Society Symposium**, Vol.47, 157-177.
- OLSON, Nicholas *et al.* (2013). –“Remediation to improve infiltration into compact soils”. **Journal of Environmental Management**, Vol.117, 85-95.
- PATO, Rosinda (2007). – “Bacia hidrográfica da ribeira dos Covões. Variáveis biofísicas e evolução do uso do solo no período 1958-2002”. **Universidade de Coimbra**.
- ROY, Allison & SHUSTER, William (2009). – “Assessing impervious surface connectivity and applications for watershed management”. **Journal of the American Water Resources Association**, Vol. 45, No. 1.

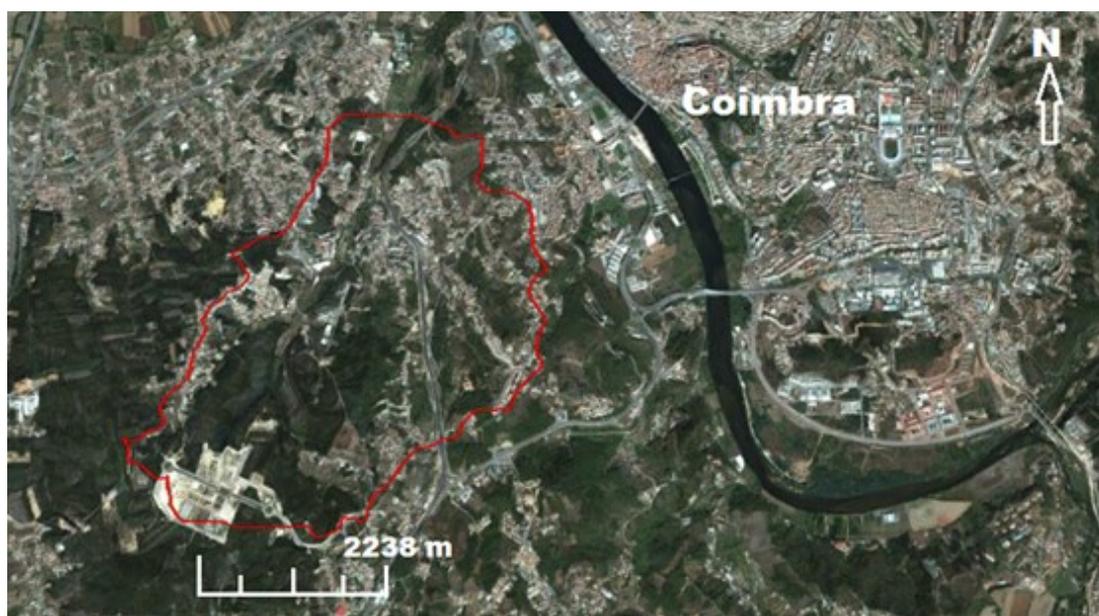


Figura 1. Localização da área de estudo (adaptado de Google Earth, 2014).

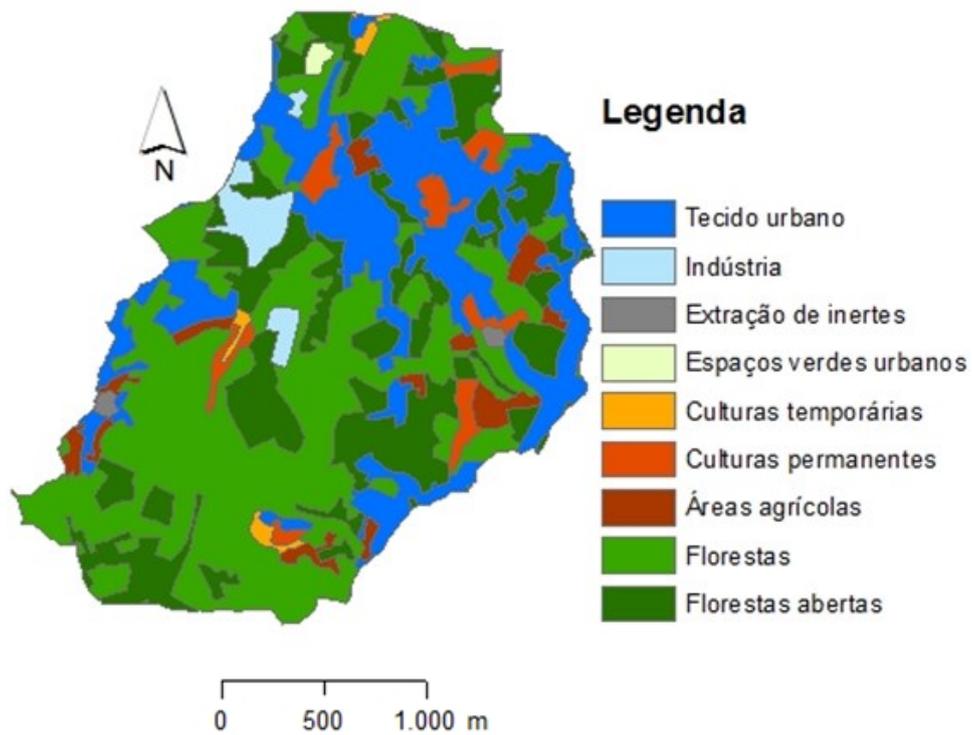


Figura 2. Carta de ocupação do solo da Ribeira Covões, (Corine Land Cover, 2006).

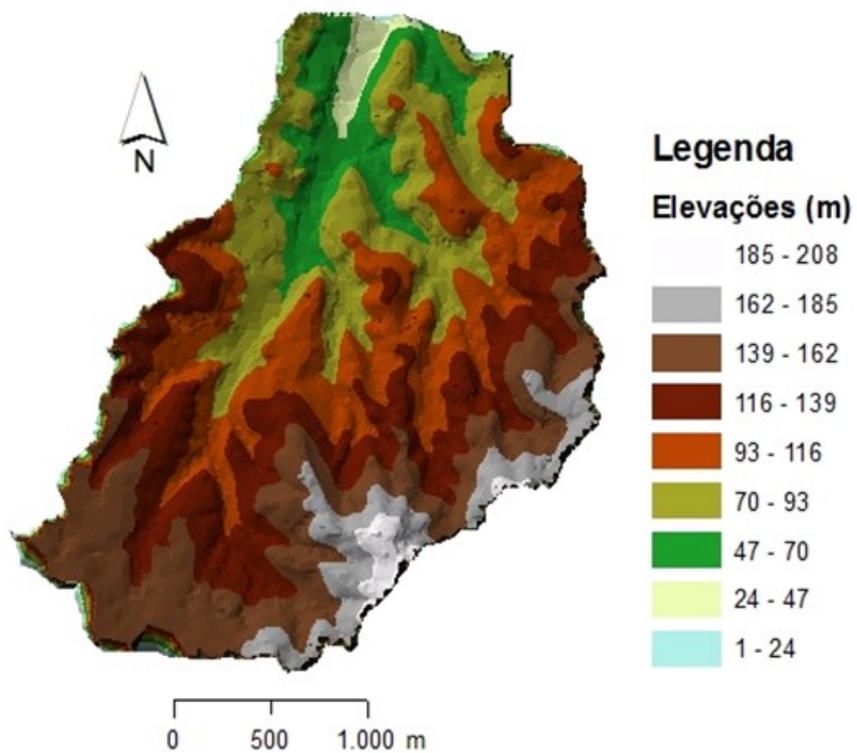
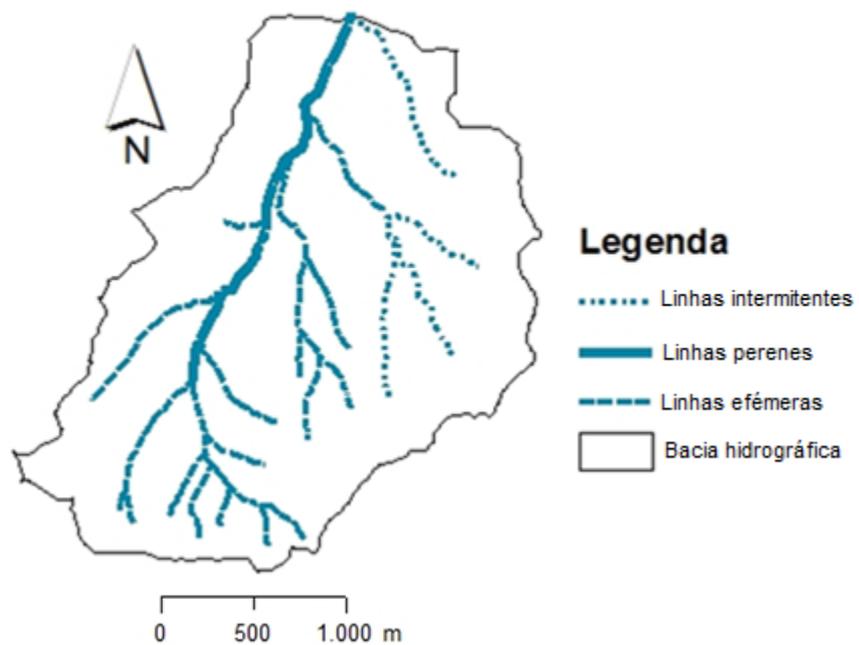
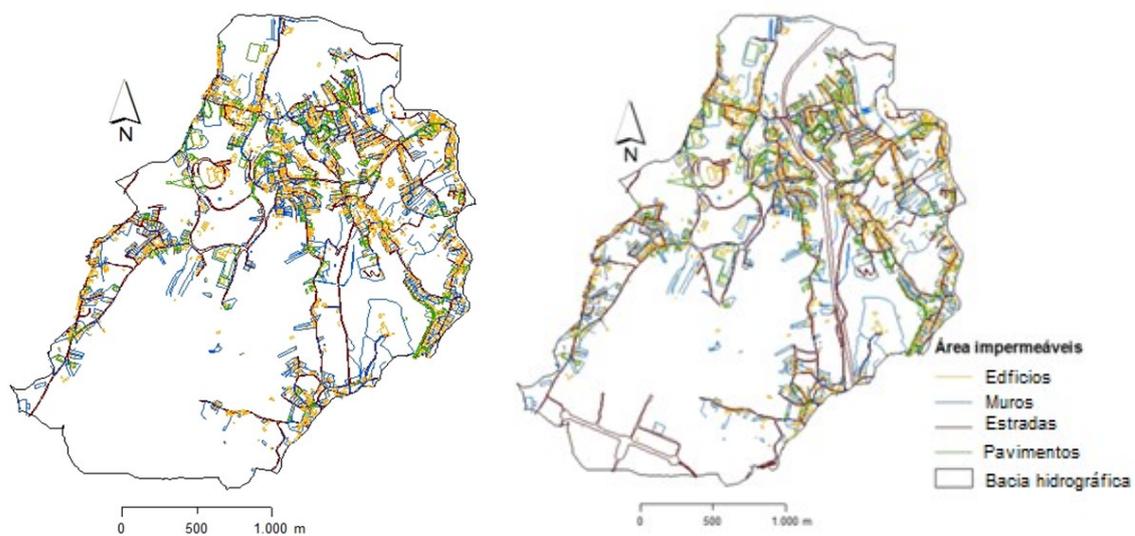


Figura 3. Modelo digital terreno da bacia hidrográfica em estudo.



**Figura 4.** Linhas de água da bacia hidrográfica.



**Figura 5.** Localização das áreas impermeáveis nos anos de 2007 (esquerda) e 2012 (direita).



Figura 6. Litologias e áreas de contribuição para os caudais monitorizados na área de estudo.

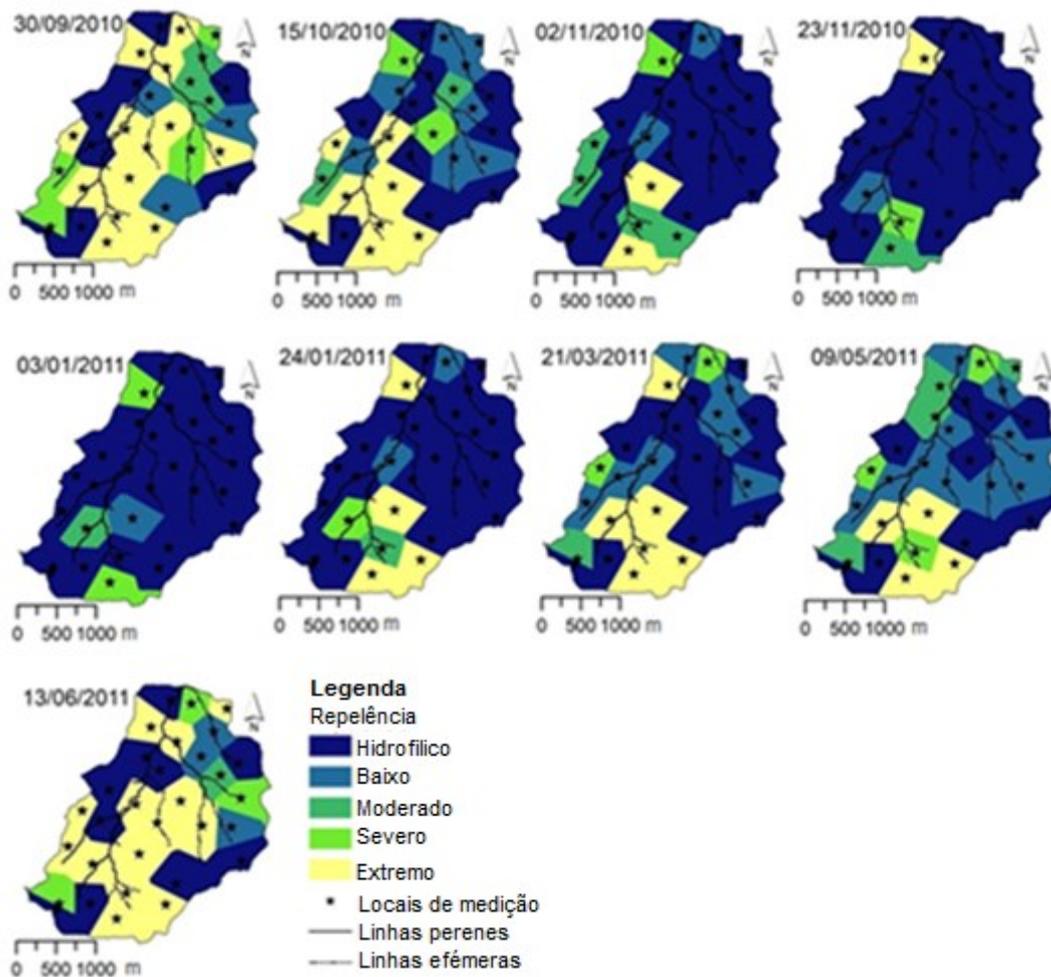
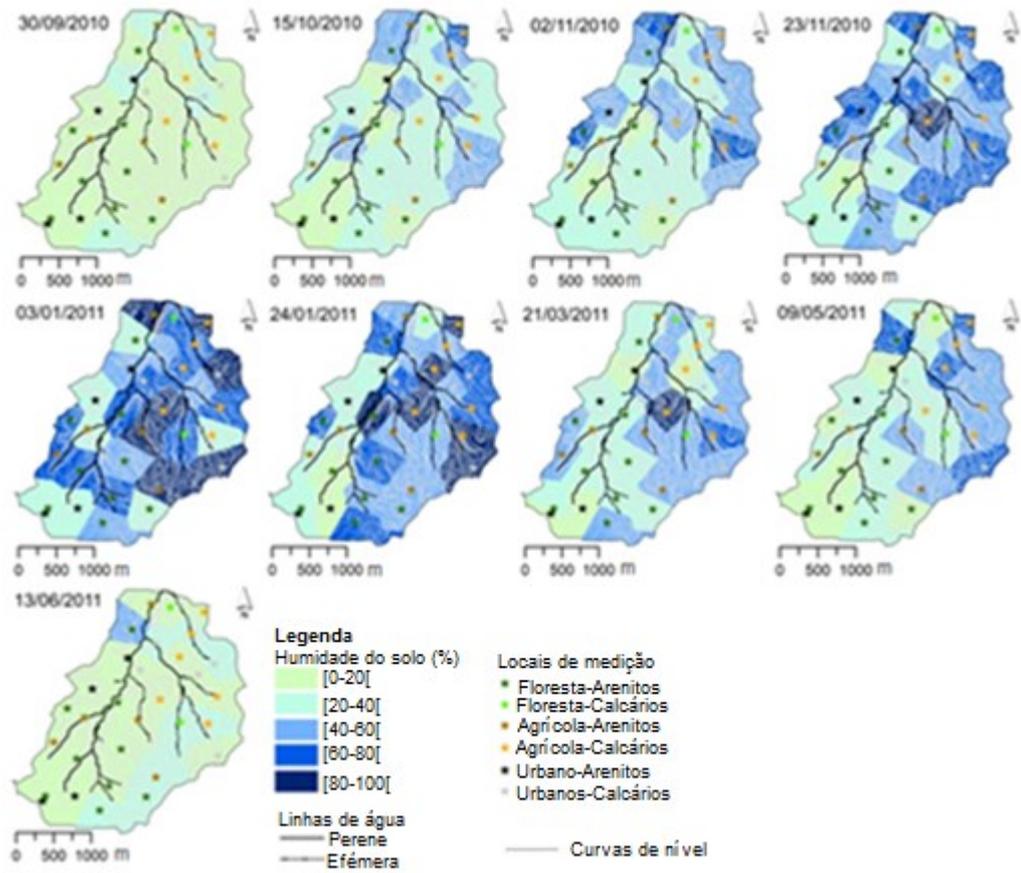
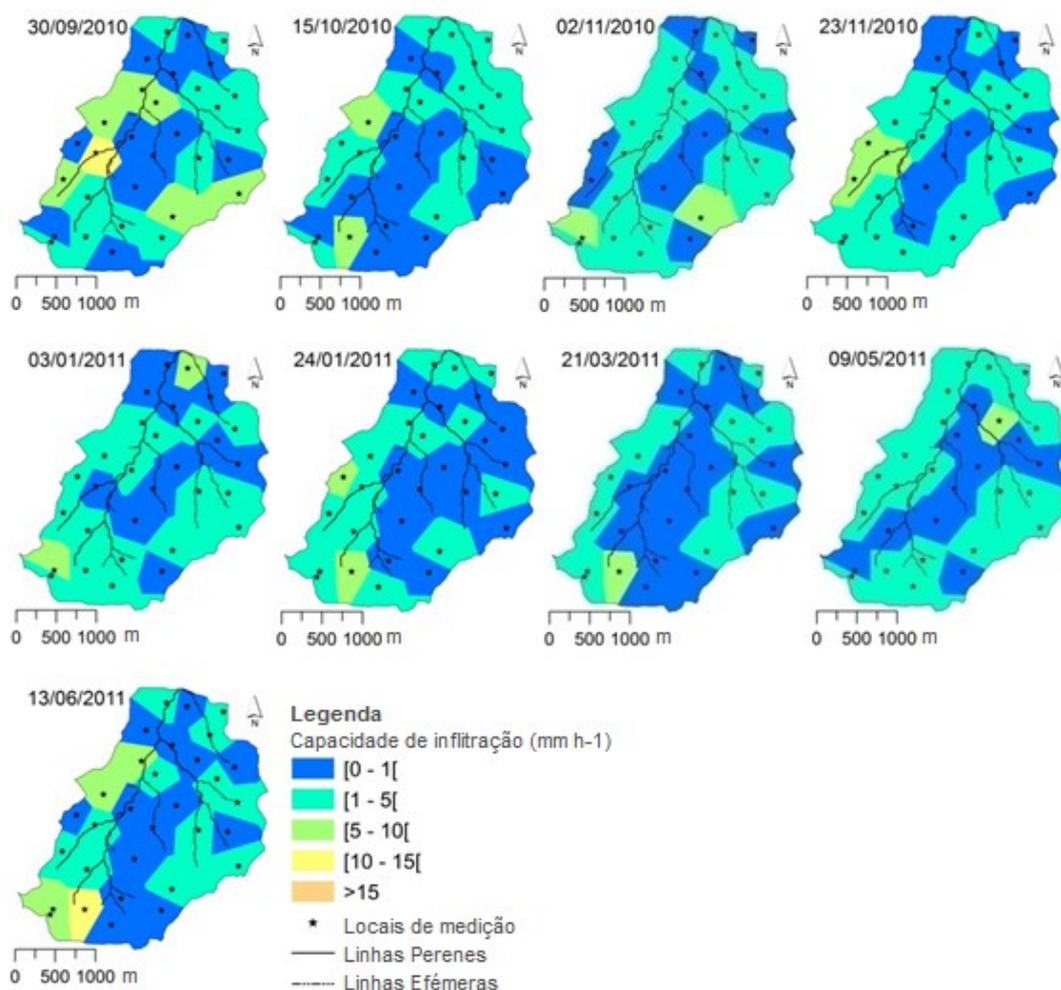


Figura 7. Variação espacial e temporal da repelência do solo durante diferentes campanhas de monitorização, baseado no método dos polígonos de Thiessen.



**Figura 8.** Variação espacial e temporal da humidade do solo durante diferentes campanhas de monitorização, baseado no método dos polígonos de Thiessen.



**Figura 9.** Representação espaço-temporal da capacidade de infiltração da matriz do solo, baseada no método dos polígonos de Thiessen.

**Tabela I.** Quantificação das áreas impermeáveis, semipermeáveis e permeáveis (ha e %) para a Ribeira dos Covões (ESAC) e as oito áreas de contribuição estudadas, entre 2007 e 2012.

Áreas de contribuição	Áreas impermeáveis		Áreas semipermeáveis				Áreas permeáveis				Total ha		
	2007		2012		2007		2012		2007			2012	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%		ha	%
ESAC	19,6	3,1	20,7	3,4	2,9	0,5	5,2	0,8	592,9	96,4	589,3	95,8	615
Covões	4,7	7,2	5,2	7,9	1,1	1,7	1,4	2,2	59,5	91,1	58,7	89,9	65,3
Drable	12	1	12,6	1,1	0,5	0	0,1	0	114,1	98,9	113,9	98,8	126,6
Espírito Santo	5,4	9,5	6,4	11,4	1,2	2,2	2,6	4,7	49,8	88,3	47,3	83,9	56,4
Mina	3	8,6	4,6	13,2	0,2	0,7	1,4	4,1	31,6	90,7	28,8	82,7	34,8
Porto Bordalo	11,2	9,9	11,7	10,3	0,9	0,8	0,9	0,8	101,4	89,3	100,9	88,9	113,6
Quinta	2,6	1,7	5,2	3,4	0,8	0,5	13,3	8,8	147,4	97,8	132,3	87,8	150,9
Ribeiro da Póvoa	13,1	3,8	13,7	3,9	3,2	0,9	3,6	1,1	329,2	95,3	328,2	95	345,5
Iparque	0	0	2,3	14,7	0	0	11,2	73	15,4	100	1,9	12,3	15,4