

Serviços dos ecossistemas hidrológicos: o caso de estudo da bacia do Rio Vez

Claudia Carvalho-Santos^(a, b*), António T. Monteiro^(b), João P. Honrado^(b, c), João Pedro Nunes^(d)

- a) CBMA – Centro de Biologia Molecular e Ambiental, Universidade of Minho, Braga
- b) CIBIO-InBio - Centro de Investigação em Biodiversidade e Recursos Genéticos, Universidade do Porto
- c) Faculdade de Ciências, Universidade do Porto
- d) CE3C – Centro de Ecologia, Evolução e Alterações Ambientais , Universidade de Lisboa

* Claudia Carvalho-Santos (c.carvalho.santos@bio.uminho.pt; c.carvalho.santos@cibio.up.pt)

Resumo

O Homem precisa dos ecossistemas para usufruir de serviços relacionados com a água, tais como: quantidade e qualidade da água, e controle da erosão do solo. A produção de serviços de ecossistema hidrológicos é influenciada não só pelas alterações climáticas, mas também pela mudança na ocupação do solo. É pois importante conhecer os impactos hidrológicos destes stressores ambientais para uma melhor gestão adaptativa às mudanças globais.

Os efeitos separados e combinados da alteração da ocupação e uso solo e das condições climáticas futuras na prestação de serviços hidrológicos foram avaliados na bacia do rio Vez, Noroeste de Portugal. O modelo eco-hidrológico SWAT (Ferramenta de Avaliação de Água e Solo) foi calibrado em relação ao caudal, sedimentos, nitratos e evapotranspiração, com uma boa concordância entre as previsões do modelo e os dados observados. Foram aplicados quatro cenários de ocupação do solo em condições climáticas atuais (eucalipto/pinheiro; carvalho; agricultura/vinha e vegetação rasteira) para ver as consequências para a sazonalidade do caudal, a qualidade da água em termos de nitratos e a erosão do solo. Posteriormente, foram aplicados cenários climáticos para os períodos 2021-40 e 2041-60 usando o cenário RCP 4.5, e comparados o período de controle 1971-2000. Por fim, os efeitos combinados de condições climáticas futuras foram avaliados sob os cenários de ocupação do solo.

Os resultados para o uso solo revelaram que a opção por um determinado cenário não comprometeria a prestação global de serviços hidrológicos. Embora as alterações climáticas tenham apenas um efeito modesto na redução do caudal anual (-7%), o efeito sobre os caudais de verão foi mais acentuado (entre -15% e -38%). Os efeitos combinados das alterações climáticas e uso do solo podem melhorar ou degradar a provisão de serviços hidrológicos. O declínio do caudal anual devido às mudanças climáticas poderá ser agravado num cenário de floresta de eucalipto/pinheiro, com especial ênfase na redução de caudais no verão (entre -34% e -49%). Por outro lado, os picos de caudal e a erosão do solo poderão ser atenuados. Num cenário de aumento da área de vinha a redução do caudal anual é menos afetada, mas as concentrações de sedimentos e nitratos no rio serão agravadas.

Os resultados, salientam a necessidade de se considerar os impactos tanto do clima como da ocupação do solo na gestão de bacias hidrográficas. A modelação permite simular cenários que são úteis para os decisores tomarem opções informadas para a gestão e ordenamento do território.

Palavras-chave: Alteração climática; Bacia do Rio Vez; Modelo hidrológico SWAT; Ocupação do solo; Serviços hidrológicos.

Introdução

Os seres humanos dependem dos ecossistemas para o fornecimento de serviços hidrológicos para o seu bem-estar (Tabela 1): (i) o fornecimento de água em termos de quantidade, qualidade e sazonalidade (para uso doméstico, agricultura, indústria, energia hidroelétrica, transporte, lazer e benefícios espirituais); e (ii) mitigação dos danos causados pela água, nomeadamente a atenuação dos efeitos causados pelas cheias e a diminuição da erosão hídrica do solo (Carvalho-Santos et al., 2014) .

Diferentes usos do solo e condições climáticas futuras tem influência na prestação de serviços hidrológicos (Brauman et al., 2007). É reconhecido que um aumento da área florestal irá diminuir o escoamento total anual de água numa determinada bacia (Brown et al., 2005; K. A. Farley et al., 2005). Por outro lado, as florestas contribuem para uma diminuição do escoamento superficial, com a consequente redução da erosão do solo, e um aumento da infiltração, reduzindo os riscos naturais relacionados com a água, em particular os riscos de cheia (Bredemeier, 2011; Ellison et al., 2017). Da mesma forma, as projeções climáticas futuras preveem uma alteração do ciclo hidrológico e em algumas regiões diminuindo a disponibilidade de água, a sua qualidade e aumentando o seu potencial destrutivo (Kundzewicz, 2008). O último relatório do IPCC (Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas) avança que haverá um aumento das temperaturas em toda a Europa e uma grande diminuição na precipitação no sul da Europa, com uma provável redução da disponibilidade de água nos rios e aquíferos, bem como um aumento dos episódios extremos de seca, ondas de calor, chuvas intensas, cheias e incêndios (Kovats and Valentini, 2014). Para Portugal, espera-se uma diminuição geral da disponibilidade de água, mais pronunciada no sul, um aumento dos problemas de qualidade da água e um aumento do risco de cheias nos meses mais chuvosos (Cunha et al., 2005). Na Galiza, noroeste da Espanha, que tem condições ambientais semelhantes ao Noroeste de Portugal, é esperado que a temperatura aumente 2°C a 3°C, com uma distribuição marcadamente irregular da precipitação, o que significa mais chuva no outono e verões mais secos (Álvarez et al., 2011). Assim, a compreensão dos impactes das várias opções de ocupação do solo e condições climáticas futuras é essencial para apoiar o planeamento e gestão dos recursos hídricos.

Neste contexto, o objetivo deste artigo foi aplicar o modelo eco-hidrológico SWAT numa bacia de média dimensão no Noroeste de Portugal (bacia do Vez), e desenvolver um conjunto de simulações para apoiar as opções de planeamento e ordenamento do território sob diferentes tipos de ocupação do solo e condições climáticas futuras. Especificamente, foram abordadas as seguintes questões: i) será que a prestação de serviços hidrológicos é influenciada por diferentes ocupações do solo, particularmente pela expansão de áreas florestais? ii) Qual será a influência das condições climáticas futuras na prestação de serviços hidrológicos, considerando um cenário médio de emissões (RCP 4.5)? e iii) Quais seriam os efeitos combinados de diferentes ocupações do solo e condições climáticas futuras na prestação de serviços hidrológicos? Finalmente, as implicações dos resultados foram discutidos para apoiar uma gestão preventiva e adaptativa de bacias hidrográficas, com ênfase nos benefícios sociais relacionados com o abastecimento de água e mitigação dos riscos relacionados com a água.

Tabela 1: Indicadores de serviço hidrológico retirados do modelo SWAT

Serviço hidrológico	Indicadores SWAT
Fornecimento de água	
Quantidade	Escoamento total anual (mm) Caudal mensal (m ³ /s)
Sazonalidade	Curva de duração de caudal (Q95 - m ³ /s) Umidade no solo (mm)
Qualidade	Concentração de nitratos (mg N/l) Exportação de nitratos (kg/ha.yr)
Mitigação danos causados pela água	
Controle da erosão do solo	Erosão do solo (t/ha.yr) % da bacia em risco de erosão do solo
Regulação de cheias	Curva de duração de caudal (Q5 - m ³ /s) Umidade no solo (mm)

Parte Experimental

Área de estudo

A área de estudo foi a bacia do rio Vez (252 Km²) está localizada nas montanhas do Soajo e da Peneda, noroeste Portugal (Figura 1). O rio Vez é um dos principais afluentes do rio Lima. O clima é considerado sub-Mediterrâneo onde a influencia atlântica predomina, com uma ligeira diminuição da precipitação nos meses de verão (Mesquita and Sousa, 2009). A média de precipitação anual e temperatura é 1500 mm/ano e 13,8 °C, respectivamente. O caudal médio anual observado (2003-2008) na estação hidrométrica Pontilhão de Celeiros foi de 1040 mm/ano. De acordo com estes valores, o rácio de geração de escoamento mostra que cerca de 70% da chuva torna-se a escoamento. A topografia é complexa, com a altitude a variar de 30 m para 1400 m, e declives acentuados em 58% da bacia. A geologia é caracterizada por granitos e algum xisto, e predominam cinco tipos principais de solo (Figura 1b): os Regossolos (67%) e os Leptosolos (9%) predominam nas áreas de elevada altitude, enquanto que nas restantes predominam os Antrossolos (22%) e os Fluvisolos (1%). Em termos da ocupação do solo (Figura 1a), áreas abertas de rocha nua, com vegetação arbustiva e áreas de floresta de transição ocupam a montanha, enquanto que nos vales predominam as áreas agrícolas e florestais (carvalho alvarinho, pinheiro bravo e eucalipto). A ausência de barragens torna esta bacia ideal para desenvolver estudos que abordam a ocupação do solo na provisão de serviços hidrológicos. Nas últimas duas décadas, os incêndios florestais que assolaram esta bacia foram degradando os solos já finos, bem como mantendo a vegetação num estado arbustivo constante. As áreas arbustivas ocupam agora cerca de 40% da bacia. Durante os episódios de precipitação intensa, ocorrem esporadicamente cheias em Arcos de Valdevez, causando principalmente prejuízos materiais. Portanto, é de grande importância compreender como a alteração na ocupação do solo, bem como as condições climáticas futuras, podem afetar a prestação de serviços hidrológicos na bacia do Vez para uma gestão mais eficaz.

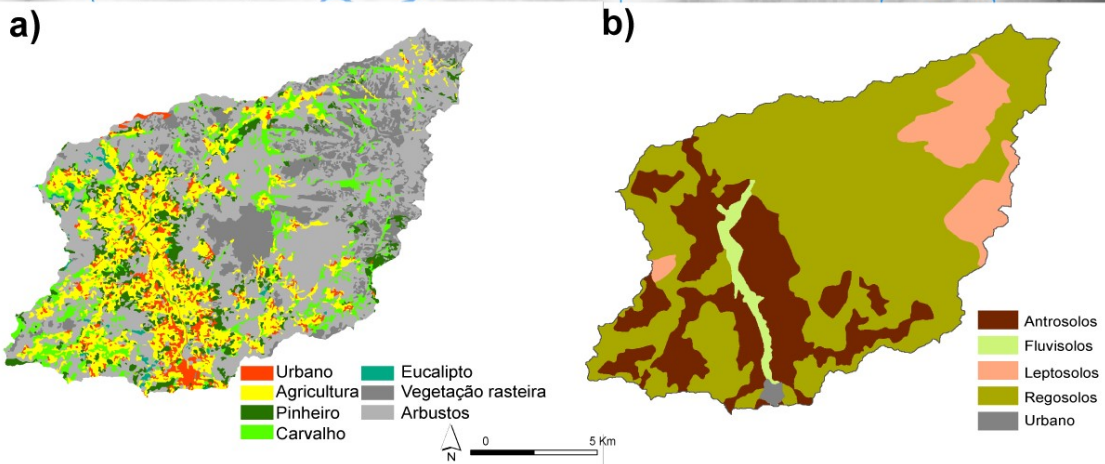
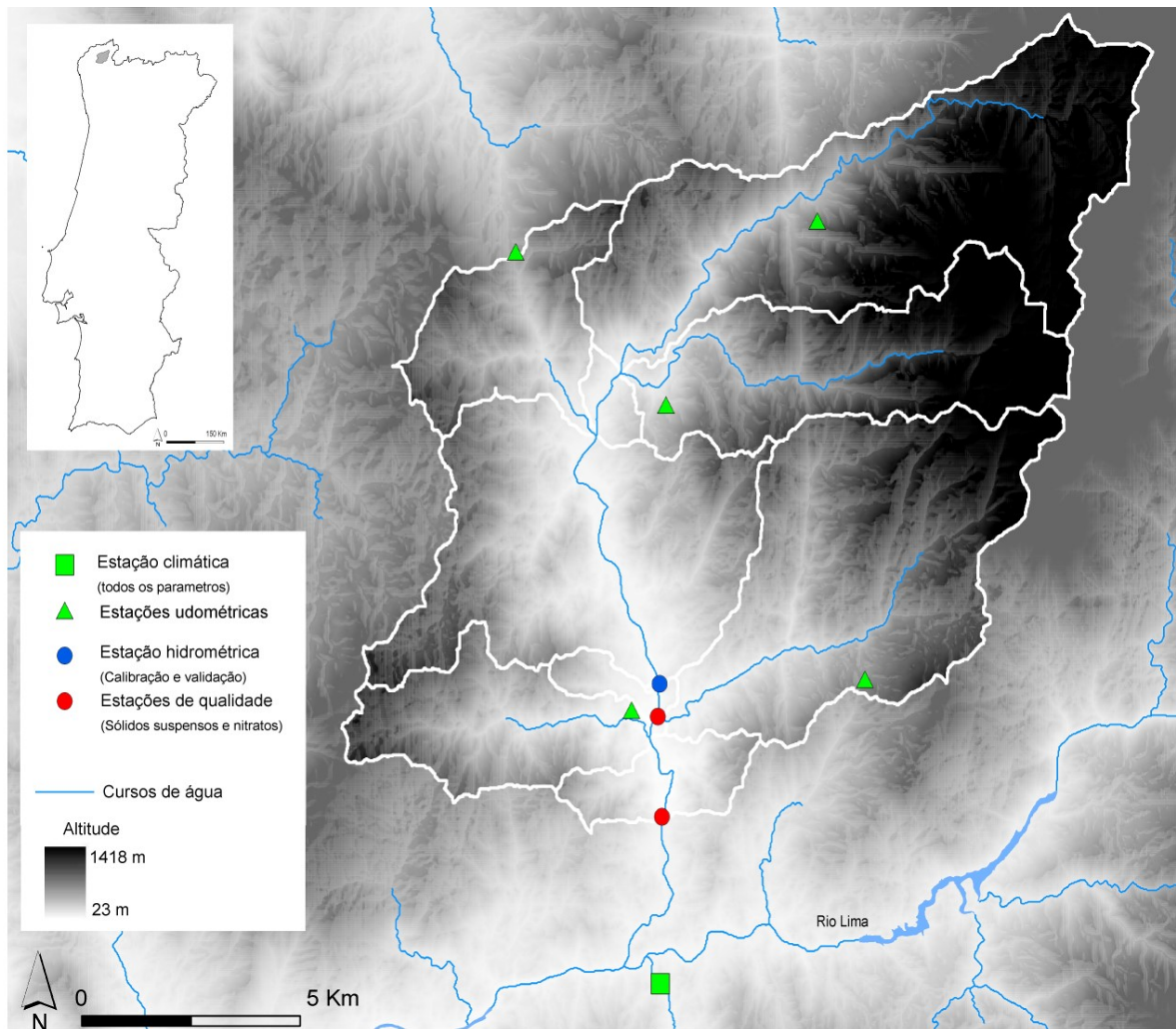


Figura 1: Localização da bacia do rio Vez e Modelo Digital de Terreno; a) Mapa de uso do solo, 2006 (SIGN II, 2008); b) Mapa de Solos (Agroconsultores and Geometral, 1995).

Calibração e validação do modelo

Alguns dos parâmetros do modelo foram ajustados manualmente em função do caudal diário observado durante o período 2003-2008 na estação hidrométrica de Pontilhão de Celeiros (SNIRH, 2012). A validação foi feita para o período 1984-89. A comparação entre os dados observados e simulados nos períodos de calibração e validação indicaram que o SWAT foi capaz de capturar e reproduzir os caudais médios e variações sazonais na bacia do Vez, com exceção dos períodos relativos a caudais muito elevados relacionados com precipitações extremas (Figura 2). A performance do modelo foi considerada boa, com valores de Nash-Sutcliffe-Efficiency (NSE) superiores a 0.65 (0.73 diário e 0.86 mensal), e uma percentagem de viés (PBIAS) entre -15 e 15% (-15 mensal e -13 diário) (Moriassi et al., 2007).

A fraca qualidade das observações de sólidos suspensos totais e nitratos impediu a validação das observações. Foi no entanto feita a calibração de sedimentos usando os valores de sólidos suspensos totais disponíveis (depois convertidos em t/ha) e nitratos (valores mensais medidos nas estações de qualidade para o período 2003-2008 - Figura 1). Alguns parâmetros no SWAT foram ajustados, nomeadamente o USLE_C, USLE_P e USLE_K. As estatísticas de performance para os sedimentos apresentam a modelação como insuficiente (PBIAS superior a 50%). Contudo, como os valores observados são extremamente baixos e pouco representativos, foi feita uma comparação com valores medidos em regiões de montanha semelhantes, por uso do solo, onde os valores simulados no SWAT se assemelham mais. Relativamente aos nitratos, o modelo simula de forma suficiente de acordo com as estatísticas de performance com PBIAS \pm 70% (-13 e 30%, outlet 7 e 10, respectivamente) (Figura 3). A calibração dos nitratos foi só ajustada através da quantidade de fertilizante aplicado nas operações agrícola.

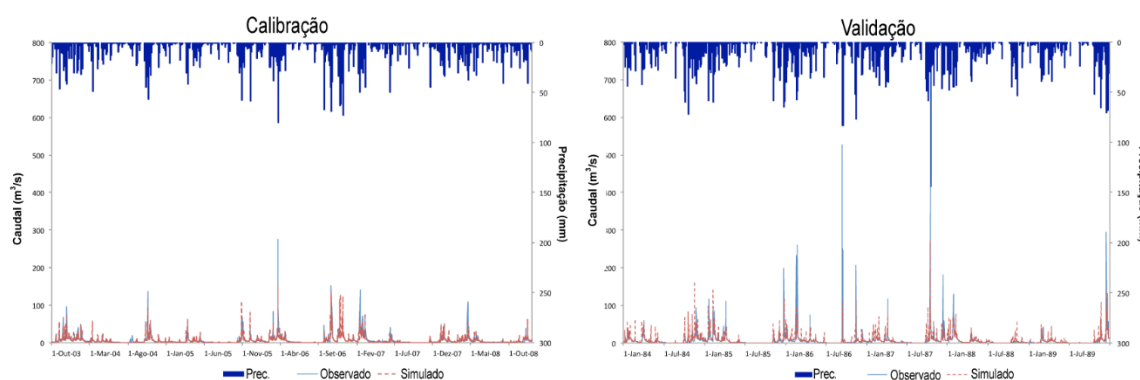


Figura 2: Caudal diário observado e simulado no SWAT (m^3/s) para o período de calibração e validação, depois de ajustados os parâmetros e precipitação diária (mm).

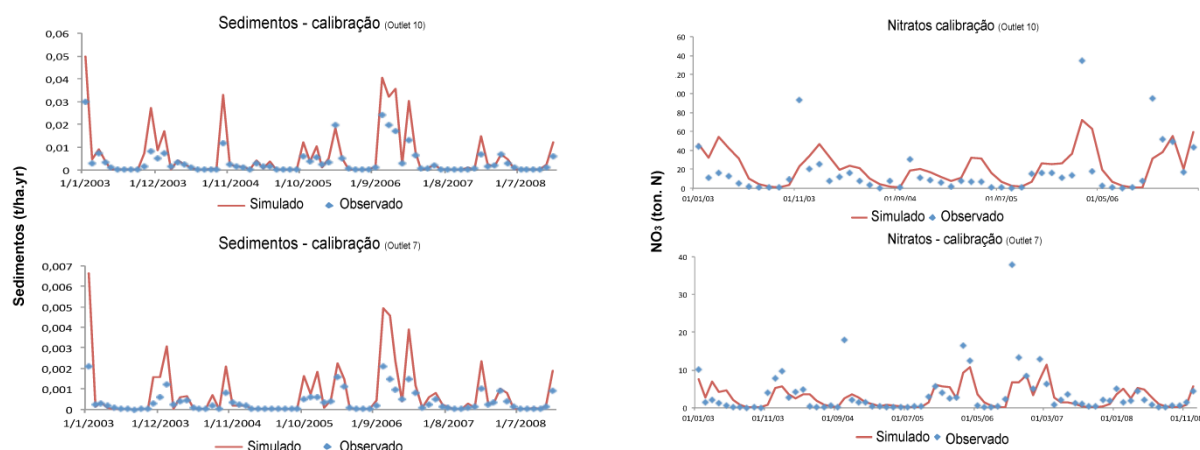


Figura 3: Comparação entre valores mensais observados e simulados para sedimentos (t/ha/ ano) e nitratos (ton. de N).

Cenários

Tendo em conta as consequências hidrológicas dos diversos cenários de uso do solo, foram criados 4 cenários hipotéticos, onde as áreas agrícolas, urbanas e os topos das montanhas permanecem como estão na atualidade: i) Carvalho – expansão da espécie autóctone *Quercus robur* ocupado 64% da bacia; ii) Eucalipto/pinheiro – ocupação de 64% da bacia com povoamentos mistos de eucalipto e pinheiro bravo, espécies de folha persistente; iii) Agricultura/vinha – criação de área de vinhas e agricultura em 64% da bacia; e iv) Vegetação rasteira – considera que a bacia vem sendo afetada por fogos e permanece num estado arbustivo constante.

Para simular as condições climáticas futuras foi usado um cenário climático de emissões médias (RCP 4.5). Para isso foi feito um downscaling estatístico de um ensemble de 4 modelos gerais de circulação (GCM), posteriormente corrigidos com dados observados (1981-2000). Os resultados evidenciaram mudanças importantes que podem ocorrer na distribuição anual da precipitação e temperatura (Tabela 2). É esperado um aquecimento generalizado com temperaturas oscilando entre 0.35°C durante a primavera e 2.02°C no verão, mais pronunciadas na temperatura máxima no período 2041-60. No período 2021-40, a precipitação média anual deverá aumentar ligeiramente (1.20%), mas acentuam-se as diferenças na distribuição anual, com um aumento importante durante o inverno (7,88%), e reduções durante a primavera e verão (-14.5%). Esses padrões podem persistir no período 2041-60, com exceção da precipitação anual que deverá diminuir 3.86%, principalmente devido à diminuição durante o verão (-24.5%).

Tabela 2: Variações na precipitação, temperatura máxima e mínima em relação a 1981-2000, na bacia do Vez.

	2021-40			2041-60		
	Δ Prec (%)	Δ TMAX (°C)	Δ TMIN (°C)	Δ Prec (%)	Δ TMAX (°C)	Δ TMIN (°C)
inverno (Jan – Mar)	7.88	0.83	0.39	7.75	1.33	0.83
primavera (Apr – Jun)	- 4.85	1.13	0.35	- 8.71	1.78	0.85
verão (Jul – Sep)	- 9.73	1.25	0.43	- 24.47	2.02	1.10
outono (Oct – Dez)	2.63	0.93	0.41	- 3.62	1.33	0.78
Anual	1.20	1.03	0.40	- 3.86	1.61	0.89

Resultados e discussão

Os resultados para as simulações na ocupação do solo revelam que nenhum cenário irá comprometer drasticamente a provisão de serviços hidrológicos (Figura 4 e Tabela 3). Espera-se uma redução do caudal anual nos cenários de floresta, mais vincada no cenário eucalipto/pinho (-7%). Essa redução está de acordo com o que foi verificado na literatura, pois a existência de floresta pressupõem um maior gasto água por evapotranspiração (Calder, 2002). No entanto, a magnitude de redução é baixa quando comparada com outros estudos (Brown et al., 2005; K. a. Farley et al., 2005). Isso pode-se explicar devido à grande quantidade de precipitação que esta bacia recebe ao longo do ano, que atenua o efeito da ocupação do solo e também devido aos solos serem delgados com pouca capacidade de retenção. Esse fraco efeito da floresta na redução do caudal anual tem também sido verificado em bacias semelhantes, como no caso da Caramulo (Hawtree et al., 2015). Pelo contrário, nos cenários de agricultura/vinha e vegetação rasteira verifica-se um aumento do caudal anual (+6 e +3%, respetivamente). Relativamente à sazonalidade na distribuição de água ao longo do ano não existem mudanças significativas a registar, salientando-se apenas uma redução dos caudais de verão no cenário de eucalipto/pinho. Já em relação à qualidade da água, poderá haver um aumento da exportação de nitratos no cenário de agricultura/vinha. Curiosamente, o número de dias com concentração de nitratos acima de 5.6 mg/l (valor de referência estabelecido em Portugal para qualidade de água superficiais) é maior no cenário de eucalipto/pinho, devido à redução do caudal.

Relativamente à mitigação do risco de cheias, no cenário de eucalipto/pinho poderá haver uma redução dos caudais de inverno, sendo encarado benéfico nesta bacia, devido ao risco de inundações no núcleo urbano de Arcos de Valdevez em episódios extremos de precipitação.

A erosão do solo não é problemática na bacia do rio Vez, visto que nunca foram simulados valores acima de 1 t/ha/ano, estabelecido como valor tolerável para formação do solo e boa qualidade da água em relação à concentração de sedimentos (Verheijen et al., 2012). Os baixos valores de erosão do solo estão relacionados com a prevalência de solos delgados ou rocha nua na bacia. O cenário de agricultura/vinha é o que apresenta maior exportação de sedimentos (0.0045 t/ha/ano), e mais dias onde a exportação de sedimentos foi maior que 0.1 t/ha/ano, limite mínimo tolerável de erosão do solo. Estes valores estão de acordo com medições feitas em parcelas no centro de Portugal, que apontam a área agrícola como o uso do solo que mais contribui para erosão do solo .

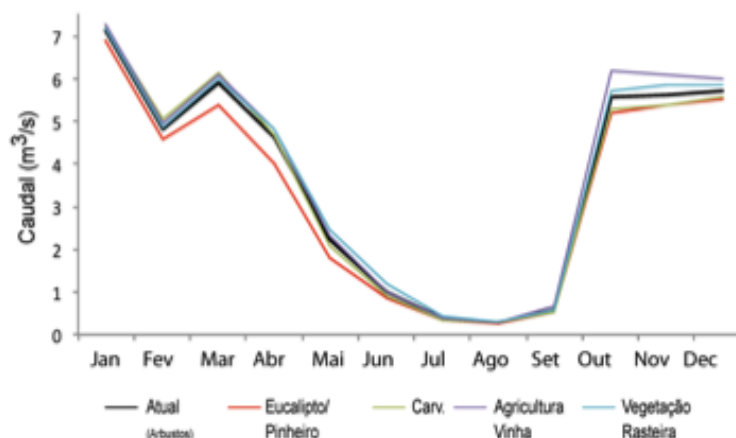


Figura 4: Caudal mensal (m^3/s) nos diferentes cenários de uso do solo.

Tabela 3: Efeitos dos diferentes cenários de ocupação do solo na prestação de serviços hidrológicos na bacia do Vez.

Cenário uso do solo	ET (mm)	Fornecimento de água (quantidade)		Sazonalidade da água e regulação de cheias			Qualidade da água			Controle da erosão do solo	
		Escoamento anual (mm/yr)	% mudança	Q5 (m^3/s)	Q95 (m^3/s)	Umidade do solo média (mm)	NO ₂ -N (mg/l)	Nº dias com NO ₂ -N maior que 5.6 mg/l	N Exportação (kg/ha.yr)	Exportação média de sedimentos (t/ha.yr)	% da bacia acima de 0.1 t/ha.yr de erosão do solo
Atual (arbustos)	590	1025		29.3	0.16	111	1.9	74	1.04	0.005	0
Eucalipto/Pinheiro	660	955	- 7	28.2	0.15	111	2.1	104	1.11	0.005	0
Carvalho	597	1017	- 1	30	0.16	121	1.9	64	1.36	0.006	0
Agricultura/Vinha	532	1083	+ 6	31	0.17	121	2.2	68	1.44	0.045	30
Vegetação Rasteira	557	1058	+ 3	30.3	0.18	125	1.7	52	1.32	0.007	0

A simulação do cenário climático futuro prevê uma redução anual do caudal cerca de -2 e -7% para 2021-40 e 2041-60, respectivamente, quando comparados com o período base (1981-2000). Simulações usando o modelo SWAT numa bacia na Galiza, preveem uma redução do caudal entre 6 a 13% usando os cenários B2 e A1 respectivamente, mas para um período mais longínquo (2071-2100) (Raposo et al., 2013). No entanto, o efeito em termos das mudanças sazonais é mais notável, principalmente na redução dos caudais de verão no período 2041-60 (até 38% de redução), e aumento dos caudais de outono e inverno no período 2021-40 (Figura 5). Isto está de acordo com as projeções climáticas para a região da Galiza, onde se espera menos precipitação anual, mais concentrada no outono e inverno, e verões mais secos (Álvarez et al., 2011). Limitações de água não tem sido um problema na bacia do rio Vez, porque a precipitação está quase sempre presente mesmo no verão. Porém, estas alterações podem levantar preocupações sobre a redução sazonal dos recursos hídricos, especialmente se for combinado com o aumento da necessidade de irrigação, devido grande parte à diminuição da precipitação. Assim, deve ser dada atenção especial às montanhas visto que são a principal fonte de água para o abastecimento de água a jusante (García-Ruiz et al., 2011). Por outro lado, o aumento de caudais de inverno poderá aumentar o risco de cheias a jusante (Figura 5). Em relação à qualidade da água, as simulações não preveem mudanças substanciais, mas há uma tendência de aumento da concentração de nitratos no caudal do rio, devido à redução de caudal (Tabela 4). Pelo contrário, as exportações de nitratos tendem a diminuir ligeiramente, provavelmente relacionadas com a redução de biomassa vegetal. As reduções na exportação de

nitratos parecem depender da magnitude do escoamento superficial e da biomassa vegetal (Molina-Navarro et al., 2014; Panagopoulos et al., 2011).

A exportação média de sedimentos poderá aumentar, principalmente do período 2041-60 (Tabela 4). Isto poderá estar relacionado com o aumento da precipitação nos meses de inverno e primavera, associado a um declínio no crescimento da biomassa devido às alterações climáticas, apresentado como possível fator em outros estudos em Portugal (Nunes and Pacheco, 2008). A área com taxas de erosão acima de 0.1 t/ha/ano poderá expandir, especialmente durante o período de 2041-60, onde 3.3% da área estaria sob risco de erosão do solo (Tabela 4). Em bacias hidrográficas com clima semelhante, a maior parte da perda de solo ocorre em pequenos eventos de precipitação com grande poder erosivo .

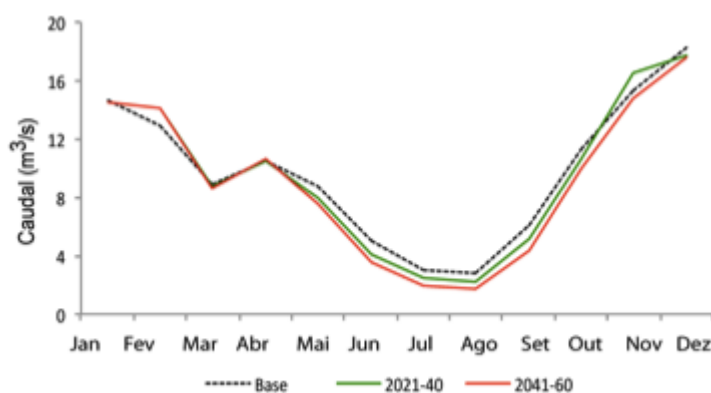


Figura 5: Caudal mensal (m^3/s) nos diferentes períodos futuros, num cenário médio de emissões (RCP 4.5).

Tabela 4: Efeitos das condições climáticas futuras num cenário de emissões médias (RCP 4.5) na prestação de serviços hidrológicos, e os efeitos combinados com diferentes tipos de ocupação do solo. Período de comparação é 1981-2000.

	ET (mm)	Fornecimento de água (quantidade)		Sazonalidade da água e regulação de cheias			Qualidade da água			Controlo da erosão do solo	
		Escoamento anual (mm/yr)	% mudança (só efeito do clima)	Q5 (m^3/s)	Q95 (m^3/s)	Umidade do solo média (mm)	NO ₃ -N (mg/l)	Nº dias com NO ₃ -N maior que 5.6 mg/l	N Exportação (kg/ha.yr)	Exportação média de sedimentos (t/ha.yr)	% da bacia acima de 0.1 t/ha.yr de erosão do solo
Base (uso do solo atual)	678	2619		48	4.3	165	0.42	0	1.83	0.014	2.5
2021-40	751	2558	- 2	48.3	3.4	156	0.67	0	1.73	0.021	2.7
2041-60	750	2443	- 7	47.6	2.5	156	0.68	0	1.77	0.018	3.3
Base (Eucalipto/Pinheiro)	886	2412	- 8	46.4	2.8	169	0.73	0	1.99	0.016	2.5
2021-40	919	2391	- 9 (-1)	47.3	2.3	164	0.75	0	1.99	0.017	2.1
2041-60	832	2360	- 9 (-2)	47	2.1	165	0.66	0	1.90	0.025	2.4
Base (Agricultura/Vinha)	717	2580	-1	48.2	4	173	0.86	2	2.38	0.088	32.5
2021-40	736	2573	- 2 (0)	49.1	3.4	170	0.88	2	2.38	0.092	34.7
2041-60	741	2451	- 6 (-5)	47	2.7	166	0.93	2	2.30	0.090	33.4

Por último, os efeitos da mudança climática na provisão de serviços hidrológicos podem ser favorecidos ou agravados em função do tipo de ocupação do solo. A simulação das condições climáticas futuras prevêem uma redução anual do caudal que será agravada no cenário de eucalipto/pinheiro (-9% em ambos os períodos) (Tabela 4). Essa redução é ainda mais acentuada nos caudais de verão (-34% e -49%) o que poderá trazer alguns problemas de escassez de água nos anos mais secos. Por outro lado, a redução dos caudais de pico no inverno

poderá ser encarada como vantajosa contribuindo para a mitigação de cheias. A redução do caudal não é tão sentida num cenário de agricultura/vinha.

No que se refere à qualidade da água, as condições climáticas futuras poderão trazer aumentos na concentração de nitratos no rio, que poderá ser agravado num cenário de agricultura/vinha onde as exportações são também maiores. De facto, a exportação de nutrientes é bastante sensível à mudança de uso de solo, pois introduz diferentes quantidades de fertilizantes (Panagopoulos et al., 2011).

Relativamente à erosão do solo, esta será maior quando o cenário de clima futuro é combinado com o cenário de agricultura/vinha, particularmente em 2021-40 quando há mais precipitação durante o inverno (Tabela 4). A percentagem da bacia com taxas de erosão acima de um valor tolerável cresce consideravelmente neste cenário (2021-40: 34.7% e 2041-60: 33.4%), quando comparado com o cenário de eucalipto/pinheiro e a ocupação do solo atual.

No geral, pode-se dizer que existem vantagens e desvantagens na opção por um tipo de ocupação do solo como estratégia de adaptação às alterações climáticas (C. Carvalho-Santos et al., 2016; Claudia Carvalho-Santos et al., 2016). O cenário de eucalipto/pinheiro aparece como favorável para a redução de picos de cheia e erosão do solo, mas pode prejudicar os caudais reduzidos de verão. Este cenário aparece como uma estratégia económica nesta bacia, devido aos rápidos dividendos (pouco mais de 1 década) que se podem tirar de eucaliptais e pinhais. No entanto, se a opção for de plantação com estratégias agressivas de mobilização do solo, o papel deste cenário na redução de erosão fica comprometido. Por outro lado, é necessário ter em conta que este cenário estará associado a uma diminuição do valor natural e da biodiversidade, quando comparado com a implementação de espécies nativas como o carvalho (Proença et al., 2010). Para além disso, o cenário eucalipto/pinheiro está associado a maior inflamabilidade e risco de incêndio, que deverá ser agravado em condições climáticas futuras.

Conclusões

O modelo eco-hidrológico SWAT foi aplicado à bacia do rio Vez, e calibrado em função do caudal diário, sólidos suspensos e nitratos mensais. Obteve-se uma boa concordância entre as previsões do modelo e observações de campo relacionadas com o caudal. A calibração de sedimentos e nitratos pode ser considerada adequada, tendo em conta as limitações dos dados observados. Perante isto, o modelo está preparado para a simulação de cenários, considerando as incertezas.

Numa primeira análise, foram comparadas as consequências hidrológicas de quatro cenários de ocupação do solo com o cenário atual dominado por área arbustiva. Diferentes opções de ocupação do solo não comprometem a prestação global de serviços hidrológicos, mas alguns cenários podem melhorar a prestação de um serviço hidrológico específico. Por exemplo, o cenário de carvalho poderá levar a uma distribuição mais regular dos fluxos de água ao longo do ano, ou o cenário de eucalipto/pinheiro reduzir os caudais de pico durante o inverno.

Posteriormente, foram simulados no SWAT dois períodos de clima futuro, 2021-40 e 2041-60, usando o cenário de emissão médio RCP4.5. Para isso, foi feito um downscaling estatístico de um ensemble médio de quatro modelos gerais de circulação, corrigidos com dados observados

no período 1981-2000. Espera-se um aumento na temperatura que poderá variar de 0.39°C no inverno (2021-40), e 2.0°C no verão (2041-60), combinada com uma diminuição da precipitação (-3,9%), que é mais pronunciada no verão (-25 %) para o período 2041-60 quando comparado com 1981-200. Embora as alterações climáticas tenham um efeito modesto na redução do caudal anual (-2% e -7%), o efeito é significativamente maior na redução dos caudais de verão (entre -15% e -38%). Espera-se um ligeiro aumento da erosão do solo, nomeadamente no inverno e um aumento da concentração de nitratos, especialmente no verão. Relativamente aos efeitos combinados das alterações climáticas e de ocupação do solo, poderá haver tanto uma melhoria como uma degradação na provisão de serviços hidrológicos. A redução do caudal anual esperado pelas alterações climáticas poderá ser agravada no cenário de eucalipto/pinheiro, com especial ênfase na redução dos caudais no verão (entre -34% e -49%). Porém, este cenário poderá contribuir para a redução dos picos de cheias no inverno e para a redução da erosão do solo derivada das alterações climáticas. Por outro lado, o cenário de agricultura/vinha poderá agravar a erosão do solo e as concentrações de nitratos derivadas das alterações climáticas.

Os resultados, salientam a necessidade de se considerar os impactos tanto do clima como da ocupação do solo na gestão de bacias hidrográficas. Isto é especialmente importante no atual foco da União Europeia em investimento nas estratégias de adaptação às alterações climáticas.

Agradecimentos

Este estudo foi financiado pelo Programa Operacional Fatores de Competitividade (COMPETE/FEDER) e do Governo Português/Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), através do Projeto Grant PTDC/AAG-MAA/4539/2012 ("IND_CHANGE").

Referências Bibliográficas

- Álvarez, V., Taboada, J.J., Lorenzo, M.N., 2011. Cambio climático en Galicia en el siglo XXI: Tendencias y variabilidad en temperaturas y precipitaciones (Climate Change in Galicia by the XXI century: tendencies and variability in temperatures and precipitation). *Rev. Av. en Ciencias la Terra* 2, 65–85.
- Brauman, K. a., Daily, G.C., Duarte, T.K., Mooney, H. a., 2007. The Nature and Value of Ecosystem Services: An Overview Highlighting Hydrologic Services. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 32, 67–98. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.32.031306.102758>
- Bredemeier, M., 2011. Forest, climate and water issues in Europe. *Ecohydrology* 4, 159–167.
- Brown, A.E., Zhang, L., McMahon, T.A., Western, A.W., Vertessy, R.A., 2005. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *J. Hydrol.* 310, 28–61.
- Calder, I.R., 2002. Forests and Integrated Water Resources Management , DFID Forestry Research on Forest and Water Interactions. Control.
- Carvalho-Santos, C., Honrado, J.P., Hein, L., 2014. Hydrological services and the role of forests: Conceptualization and indicator-based analysis with an illustration at a regional scale. *Ecol. Complex.* 20. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2014.09.001>
- Carvalho-Santos, C., Nunes, J.P., Monteiro, A.T., Hein, L., Honrado, J.P., 2016. Assessing the effects of land cover and future climate conditions on the provision of hydrological services in a medium-sized watershed of Portugal. *Hydrol. Process.* 30. <https://doi.org/10.1002/hyp.10621>

- Carvalho-Santos, C., Sousa-Silva, R., Gonçalves, J., Honrado, J.P., 2016. Ecosystem services and biodiversity conservation under forestation scenarios: options to improve management in the Vez watershed, NW Portugal. *Reg. Environ. Chang.* 16, 1557–1570. <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0892-0>
- Cunha, L.V., Oliveira, R.P., Nascimento, J., Ribeiro, L., 2005. Impacts of climate change on water resources: a case-study for Portugal, in: *The Fourth Inter-Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources*, July 11-14, 2005. International Association of Hydrological Sciences, Guimarães.
- Ellison, D., Morris, C.E., Locatelli, B., Sheil, D., Cohen, J., Murdiyarso, D., Gutierrez, V., Noordwijk, M. van, Creed, I.F., Pokorny, J., Gaveau, D., Spracklen, D. V., Tobella, A.B., Ilstedt, U., Teuling, A.J., Gebrehiwot, S.G., Sands, D.C., Muys, B., Verbist, B., Springgay, E., Sugandi, Y., Sullivan, C.A., 2017. Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Glob. Environ. Chang.* 43, 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002>
- Farley, K. a., Jobbagy, E.G., Jackson, R.B., 2005. Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy. *Glob. Chang. Biol.* 11, 1565–1576. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01011.x>
- Farley, K.A., Jobbagy, E.G., Jackson, R.B., 2005. Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy. *Glob. Chang. Biol.* 11, 1565–1576.
- García-Ruiz, J.M., López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano, S.M., Martínez, T.L., Beguería, S., 2011. Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth Sci. Rev.* 105, 121–139.
- Hawtree, D., Nunes, J.P., Keizer, J.J., Jacinto, R., Santos, J., Rial-Rivas, M.E., Boulet, A.K., Tavares-Wahren, F., Feger, K.H., 2015. Time series analysis of the long-term hydrologic impacts of afforestation in the Águeda watershed of north-central Portugal. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19, 3033–3045.
- Kovats, S., Valentini, R., 2014. IPCC WGII AR5 - Chapter 23. Europe, Chapter 23. Europe. IPCC Intergovernmental Panel on climate change.
- Kundzewicz, Z.W., 2008. Climate change impacts on the hydrological cycle. *Ecohydrol Hydrobiol.* 8, 195–203.
- Mesquita, S., Sousa, A.J., 2009. Bioclimatic mapping using geostatistical approaches: application to mainland Portugal. *Int. J. Climatol.* 29, 2156–2170.
- Molina-Navarro, E., Trolle, D., Martínez-Pérez, S., Sastre-Merlín, A., Jeppesen, E., 2014. Hydrological and water quality impact assessment of a Mediterranean limno-reservoir under climate change and land use management scenarios. *J. Hydrol.* 509, 354–366.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE* 50, 885–900.
- Nunes, P., Pacheco, N.R., 2008. Vulnerability of water resources , vegetation productivity and soil erosion to climate change in Mediterranean watersheds. *Hydrol. Process.* 3134, 3115–3134. <https://doi.org/10.1002/hyp>
- Panagopoulos, Y., Makropoulos, C., Mimikou, M., 2011. Reducing surface water pollution through the assessment of the cost-effectiveness of BMPs at different spatial scales. *J. Environ. Manage.* 92, 2823–2835.
- Proença, V., Pereira, H.M., Guilherme, J., Vicente, L.I., 2010. Plant and bird diversity in natural forests and in native and exotic plantations in NW Portugal. *Acta Oecologica* 36, 219–226.
- Raposo, J.R., Dafonte, J., Molinero, J., 2013. Assessing the impact of future climate change on groundwater recharge in Galicia-Costa, Spain. *Hydrogeol. J.* 21, 459–479.
- Verheijen, F.G.A., Jones, R.J.A., Rickson, R.J., Smith, C.J., Bastos, A.C., Nunes, J.P., Keizer, J.J., 2012. Concise overview of European soil erosion research and evaluation. *Acta Agric. Scand. Sect. B - Soil Plant Sci.* 62, 185–190.