

A adequabilidade climática ao mosquito vector da malária, *Anopheles atroparvus*, em cenários climáticos futuros

César Capinha^{1*}, Eduardo Gomes², Eusébio Reis¹, Jorge Rocha¹, Carla A. Sousa², A. Paulo Almeida²,
Virgílio E. do Rosário³

¹Centro de Estudos Geográficos, Universidade de Lisboa

²Unidade de Entomologia Médica, ³CMDT-LA, Instituto de Higiene e Medicina Tropical, Universidade Nova de Lisboa

*cesarcapinha@hotmail.com – Centro de Estudos Geográficos da Universidade de Lisboa – Faculdade de Letras – Alameda da Universidade – 1600-214 Lisboa – Telf.: 21 7940218

Resumo

Este trabalho pretende modelar espaços climáticos futuros para um dos principais vectores de malária conhecidos no Continente Europeu, *Anopheles atroparvus*. Para tal, procedeu-se à aplicação de modelos estatísticos, calibrados com a distribuição actual da espécie, sobre variáveis climáticas representativas de quatro cenários climáticos futuros. Os resultados obtidos revelam a tendência para novos extremos climáticos em várias áreas onde a espécie ocorre actualmente, aos quais está associado um grau de incerteza elevado quanto à variação da adequabilidade à espécie. Ainda assim, para as restantes áreas da Europa reconhece-se uma tendência geral para o aumento de valores de adequabilidade climática, tal como a sua subida em latitude.

Introdução

A malária, também conhecida em Portugal como paludismo ou sezonismo, é um dos principais problemas globais de saúde, sendo responsável por um a três milhões de mortes todos os anos (Muturi *et al.*, 2008). A malária humana é causada por quatro espécies de protozoários do género *Plasmodium*, sendo a sua transmissão efectuada unicamente através da picada de fêmeas de alguns mosquitos do género *Anopheles*. Na Europa Ocidental, em particular na Península Ibérica, *Anopheles atroparvus* Van Thiel, 1927 foi uma das principais espécies vectoras.

A relação entre a distribuição das espécies do género *Anopheles* e o clima é conhecida (Lindsay *et al.*, 1998; Kuhn *et al.*, 2002). Esta surge, sobretudo, como consequência da elevada sensibilidade destes organismos ao conjunto de factores ecológicos associados a

cada contexto climático. Alterações nesta combinação de factores, implica também, de uma forma potencial, alterações na distribuição das populações de mosquitos (Martens *et al.*, 1999), sendo recentemente as alterações climáticas referidas como causa para a sua redistribuição (Minář *et al.*, 2007), ou aumento de abundância e consequentes modificações dos níveis de incidência de malária (Patz e Olson, 2006). No contexto actual de globalização, torna-se importante conhecer quais os efeitos que as alterações climáticas futuras poderão ter sobre as populações de *Anopheles atroparvus*. Um possível aumento de densidades deste vector, associado a um crescente intercâmbio populacional com países onde a doença é endémica, pode potenciar o risco de infecção em locais onde o seu endemismo tem estado ausente.

O trabalho aqui apresentado consiste na obtenção de espaços climáticos futuros da espécie *Anopheles atroparvus*, partindo da sua distribuição actual. Os resultados obtidos permitem obter uma imagem inicial de como este vector de malária poderá reagir, em termos de distribuição potencial, a alterações climáticas futuras.

Registos de distribuição da espécie

De forma a recolher registos de ocorrência desta espécie foi efectuada uma pesquisa de publicações onde estes pudessem constar (*e. g.* Ramsdale e Snow, 2000). Destes, com o objectivo de reduzir a incerteza espacial, consideraram-se apenas os que permitiam a identificação de áreas não superiores a $0,5^\circ \times 0,5^\circ$. Para evitar a redundância de valores foi ainda considerado apenas um registo por célula. No que se refere à dimensão temporal dos levantamentos, não foram integrados registos correspondentes a levantamentos efectuados fora do período de calibração da distribuição actual da espécie (1970-1999). Respeitando estes critérios totalizaram-se 97 registos de ocorrência.

A informação mais reduzida e de detalhe espacial inferior para áreas de ausência, levou a que fossem extraídas pseudo-ausências de forma aleatória e circunscritas aos limites interiores de grandes regiões onde a ocorrência de *An. atroparvus* não está registada. Tendo em consideração a remoção de 20% do total de registos de presenças ($n=19$), para efeitos de validação, restando 78 para calibração, foram gerados 780 registos de pseudo-ausências, distribuídos equitativamente em dez grupos.

Informação climática e variáveis independentes consideradas

A informação climática utilizada deriva do *Community Climate System Model 3* (CCSM-3), um modelo público de circulação atmosférica global. Deste foram utilizados dados referentes à média de experimentações *20th Century Experiment* para o período referente aos registos de presenças da espécie (1970-1999), de forma a calibrar a sua distribuição actual. Foram também utilizados dados médios de experimentações relativas a cenários climáticos futuros, a partir dos quais se procedeu à projecção das alterações do espaço climático da espécie. Os modelos climáticos disponibilizados por esta infra-estrutura para o século XXI integram as informações constantes no 4.º Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental de Alterações Climáticas (IPCC, 2007), representando três cenários futuros distintos, associados a três níveis de emissão de gases de efeito de estufa (GEE): baixos (B1); médios (A1B); elevados (A2) e um modelo de experimentação com a designação *Climate Change Commitment* (CCC). O CCC corresponde a um cenário experimental que simula o clima do século XXI considerando uma concentração de GEE a níveis constantes e idênticos aos registados no ano 2000.

As variáveis obtidas correspondem a dados espaciais de temperatura e precipitação, derivados da média das experimentações do CCSM-3 para cada um dos cenários. Os dados de temperatura foram obtidos sob a forma de média mensal, a partir da qual se obtiveram as médias do trimestre mais quente e do trimestre mais frio. A informação relativa à precipitação foi obtida sob a forma de fluxo de precipitação.

A escolha destas variáveis deriva do conhecimento pré-existente de que as variáveis climáticas são influentes na distribuição da generalidade das espécies a uma escala continental (Pearson e Dawson, 2003), e que apresentam relações directas sobre as populações de mosquitos (Kuhn *et al.*, 2002; Paaijmans *et al.*, 2007). Foi ainda considerada a inclusão da variável altitude, obtida com recurso aos dados altimétricos matriciais presentes no Modelo Digital do Terreno GTOPO30.

De forma evitar a ocorrência de multicolinearidade, assim como redundância de dados, foi efectuado o cálculo do coeficiente de correlação de Pearson entre diversas variáveis independentes referidas, não se tendo verificado a existência de correlações consideradas elevadas ($r > 0,7$).

Calibração

Para realizar a calibração dos dados foram considerados dois métodos estatísticos: regressão logística binária e redes neuronais artificiais.

Como forma de verificar o grau de ajustamento de cada modelo intermédio da regressão logística binária, foi realizado o teste de Hosmer-Lemeshow. Neste verificou-se a existência de elevados ajustamentos entre os valores de cada modelo e os valores esperados, não ocorrendo diferenças significativas ($p < 0,05$), como é idealmente pretendido. O modelo final correspondeu à média aritmética simples dos 10 conjuntos de calibração.

A implementação da rede neuronal deste modelo foi efectuada numa rede do tipo perceptrão múltipla camada. Esta incluiu os valores de cada variável independente sob a forma de um neurónio na camada de entrada, uma camada oculta com tantos neurónios quantos os existentes na camada de entrada (4), e uma camada de saída com um neurónio, correspondente à variável dependente com os registos de presenças e pseudo-ausências. Como medida de erro neste processo de aprendizagem foi definido o erro quadrático médio, sendo o período de treino para cada estimação de 400 000 épocas. Para este método estatístico, devido à sua natureza heurística, foram realizados três modelos por cada conjunto de calibração. O modelo representativo de cada conjunto de calibração é obtido pela média aritmética simples dos três, e o final pela média destes.

Validação

A validação de modelos de distribuições futuras é na generalidade dos casos de concretização impossível para o momento em que se efectuam as projecções. Tal deriva da necessidade de dados acerca de acontecimentos ainda não ocorridos. Esta situação faz com que a avaliação destes modelos se efectue maioritariamente sobre registos da distribuição actual da espécie. Para fazer face às limitações da avaliação de modelos quando se dispõe apenas de registos de presenças, optou-se pelo desenvolvimento de uma metodologia baseada no conceito de Área Mínima de Adequabilidade Máxima, proposta por Engler *et al.* (2004). Ampliando a metodologia destes autores procedeu-se à análise da relação entre a percentagem de área abrangida, com a percentagem de presenças correctamente identificadas, por limite de adequabilidade. O valor de desempenho global corresponde à área compreendida entre a variação destas duas,

considerando que o valor percentual de desempenho é uniformemente superior ao da área afectada pelo modelo. O valor obtido para o modelo resultante da regressão logística foi de 0,45, tendo o valor referente ao modelo das redes neuronais sido de 0,39.

Análise da adequabilidade climática actual

A adopção da combinação de modelos é proposta por alguns autores como uma forma de construção de projecções futuras mais robustas (*e.g.* Araújo e New, 2006). Com isto pretende-se fazer sobressair as suas áreas de concordância. Esta opção é ainda reforçada no presente caso pelo facto de os modelos obtidos não apresentarem um grande distanciamento nos seus valores de validação. O modelo de adequabilidade climática actual da espécie foi então obtido pela combinação dos dois modelos finais, através da média dos seus valores. O modelo resultante encontra-se representado na figura 1.

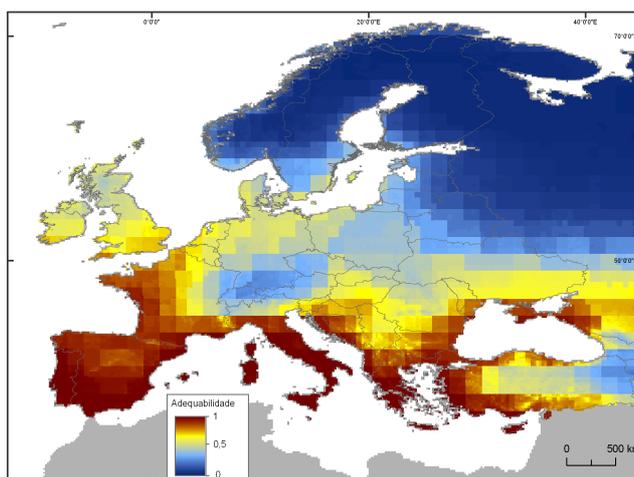


Figura 1 – Modelo de adequabilidade climática actual de *Anopheles atroparvus*

Os valores obtidos por este modelo contrastam com algum do conhecimento actual acerca da distribuição desta espécie. Para vários dos locais indicados como adequados, não são conhecidos registos da espécie, como é o caso do Sul de Itália, Grécia ou Turquia (Ramsdale e Snow, 2000). Ainda assim, é uma das espécies mais abundantes no Sul de Portugal (Ribeiro *et al.*, 1998) e dispersa por grande parte de Espanha (Ramsdale e Snow, 2000, citando Eritja *et al.*, 1998), áreas com características climáticas semelhantes. A restante adequabilidade climática apontada pelo modelo apresenta uma elevada coerência espacial com as ocorrências conhecidas, nomeadamente para as Ilhas Britânicas, França, Europa Central e Países Nórdicos.

A elevada dispersão da espécie ao longo do Continente Europeu, aponta para um efeito reduzido que potenciais barreiras naturais possam ter sobre esta. Como tal, é de crer que a razão para a ausência de *An. atroparvus* em grande parte da bacia do Mediterrâneo resulte de fenómenos de natureza biótica, nomeadamente exclusão por competição. É assim de evidenciar a presença aí de outras espécies deste género, como *Anopheles melanoon* Hackett, 1934 (Ramsdale e Snow, 2000), um potencial competidor com *An. atroparvus*.

Análise da adequabilidade climática futura

A interpretação de modelos de espaço climático futuro de *An. atroparvus* deve ser feita de forma cautelosa, tendo sempre presente as limitações que lhe estão inerentes. Destas já se identificou previamente a existência de valores de elevada adequabilidade para locais na bacia do Mediterrâneo, onde a ocorrência da espécie não está registada actualmente. Outra limitação prende-se com a extrapolação de dados (Pearson *et al.*, 2006). A modelação de aspectos ligados a distribuições futuras apresenta-se potencialmente propensa a situações extremas de extrapolação, uma vez que deriva de informação independente não integrante nos processos de calibração. Estas situações podem fazer com que os modelos ignorem que a resposta da espécie se possa alterar face a determinadas conjugações de valores exteriores aos fornecidos. De forma a entrar em conta com a extrapolação na interpretação dos modelos de adequabilidade climática futura de *An. atroparvus*, procedeu-se para cada cenário, à delimitação espacial de valores obtidos dessa forma.

A geração dos modelos futuros para *An. atroparvus* foi realizada pela aplicação dos parâmetros obtidos pelos modelos com base na sua distribuição actual (figura 2). Uma primeira análise dos modelos obtidos permite identificar extensas áreas correspondentes a valores obtidos por extrapolação. Como seria de esperar à partida, estas ocorrem sobretudo junto dos limites actuais de ocorrência da espécie. Para o cenário CCC verifica-se um ligeiro acréscimo de adequabilidade para várias áreas do Continente Europeu, particularmente nas latitudes superiores. Considerando o facto de que este cenário não integra emissões de GEE posteriores a 2000, é de perspectivar que, independentemente dos níveis de emissão ocorridos desde então e das suas variações futuras, *An. atroparvus* enfrentará alterações na distribuição futura de áreas

climaticamente adequadas à sua existência.

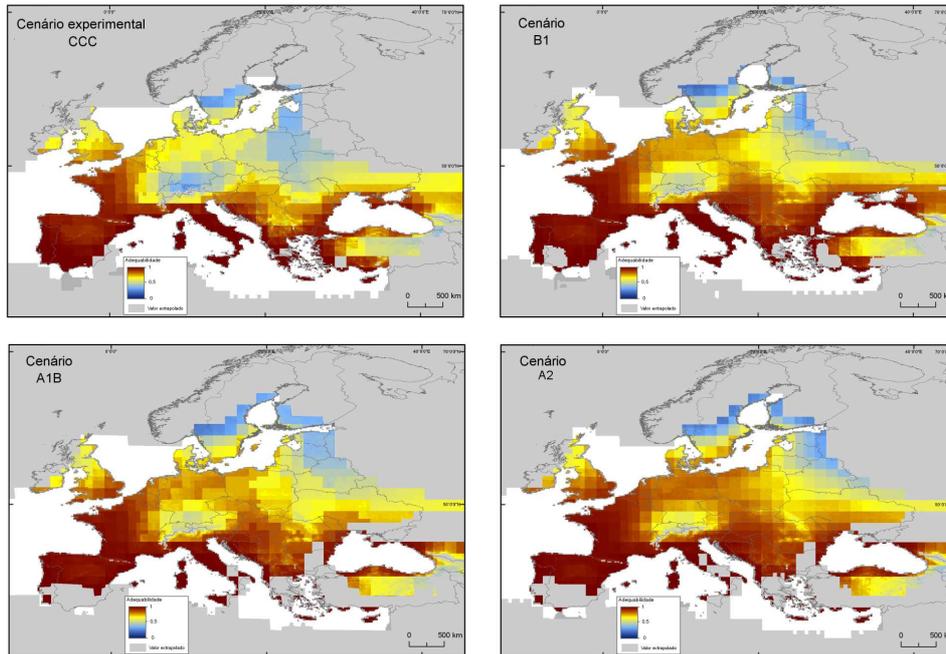


Figura 2 – Espaços climáticos para *Anopheles atroparvus* com base em cenários climáticos futuros, centrados no período 2040 - 2070

Similarmente, uma análise visual sobre os outros três cenários permite identificar um aumento geral das condições de adequabilidade climática ao longo da área de estudo. Estes, no entanto, implicam também a chegada de novos extremos climáticos para algumas áreas onde a espécie ocorre actualmente, como por exemplo na Península Ibérica. Tais alterações são concordantes à partida com uma maior adequabilidade, uma vez que a adequabilidade climática para esta espécie aponta as áreas europeias de clima mais quente como as mais adequadas (figura 1). Se a espécie estiver já próxima dos limites de tolerância a algum dos factores climáticos considerados, estes podem, no entanto, agir de forma contrária.

De forma a melhor permitir a comparação da variação de adequabilidade climática à espécie, procedeu-se ao cálculo de vários parâmetros estatísticos básicos, assim como de alguns atributos espaciais das áreas de elevada adequabilidade ($\geq 0,75$), para cada um dos cenários modelados (Quadro I). Além destes, incluiu-se também o modelo correspondente à distribuição actual, com as áreas sujeitas a extrapolação de valores previamente removidas.

Quadro I – Parâmetros estatísticos e atributos espaciais básicos dos modelos de adequabilidade.

Contexto climático	Adequabilidade							Adequabilidade $\geq 0,75$		
	Média	D.P.	Mín.	Q1	Mediana	Q3	Máx.	Área (Km ²)	% Total	Latitude centróide
Clima actual	0,67	0,21	0,0	0,49	0,65	0,86	1	2143600	42	42° 53'
Cenário exp. CCC	0,7	0,19	0,12	0,54	0,69	0,88	1	2450000	45	43° 33'
Cenário B1	0,75	0,18	0,18	0,62	0,76	0,91	1	3282400	57	45° 10'
Cenário A1B	0,73	0,19	0,19	0,59	0,73	0,89	1	2728800	51	45° 44'
Cenário A2	0,75	0,19	0,16	0,64	0,78	0,90	1	3223200	61	46° 35'

A análise nos parâmetros estatísticos dos resultados obtidos permite identificar três conjuntos: um formado pelo modelo da distribuição actual, com o valor médio de adequabilidade mais baixo (0,67) e uma distribuição com valores inferiores aos restantes modelos; o segundo, correspondente ao cenário experimental CCC, com valores intermédios; e um terceiro, compreendendo os três cenários climáticos futuros, com parâmetros estatísticos relativamente próximos. As projecções de aumento de áreas de elevada adequabilidade ($\geq 0,75$) para estes cenários futuros, não se apresentam, no entanto, tão semelhantes. Tal é visível sobretudo nos resultados do cenário A1B. Este cenário, associado a níveis médios de emissão de GEE, possui uma área total de valores de elevada adequabilidade substancialmente inferior ao obtido através do modelo resultante de baixos níveis de emissão (B1). Da mesma forma, o modelo respeitante aos níveis de emissão mais elevados (A2) tem também uma área de elevada adequabilidade relativamente inferior à obtida pelo cenário B1. Esta situação é entendida como um efeito da remoção de áreas com valores extrapolados. O cenário A1B implica, à semelhança do A2, extensas áreas de extrapolação a serem removidas sem, no entanto, atingir valores que potenciem adequabilidades tão elevadas quanto as do segundo para as restantes áreas. Por outro lado, o cenário B1 implica alterações menos significativas nas variáveis climáticas e como tal a extracção de um menor número de áreas extrapoladas. As alterações climáticas transmitidas por este, ainda assim, produzem aumentos acentuados dos níveis de adequabilidade para *An. atroparvus*. Ou seja, neste cenário ocorre uma maior expansão espacial do clima actualmente associado à ocorrência da espécie.

A análise da deslocação do centróide de cada uma das áreas de maior adequabilidade, permite ainda verificar a existência, para todos os cenários, de valores de latitude

superiores ao verificado para o espaço climático actual.

Conclusão

Considerando a hipótese de as áreas de extrapolação corresponderem a locais não adequados à espécie, é possível que baixos níveis de emissões futuras de GEE possam originar maiores extensões de áreas climaticamente adequadas para *An. atroparvus* do que emissões elevadas. Estas podem implicar ainda a inadequabilidade futura de determinadas áreas, nomeadamente na Península Ibérica. Os resultados apontam também para uma tendência de subida em latitude das áreas climaticamente mais adequadas.

Todas estas considerações devem, no entanto, ter presente a elevada incerteza inerente as estas projecções futuras, quer por aspectos relativos à espécie e das suas relações com o meio, quer da própria informação climática. Como tal, os resultados obtidos devem ser considerados sobretudo como ponto de partida para investigações mais aprofundadas ou como referência metodológica.

Agradecimentos

Financiamento: (i) “EDEN-Emerging Diseases in an European Changing Environment” (EU grant GOCE-2003-010284 EDEN); (ii) “Arbovirus dos mosquitos de Portugal” (POCTI/35775/ESP/2000). Os conteúdos desta publicação são da responsabilidade dos autores e não reflectem necessariamente a visão da Comissão Europeia.

Referências bibliográficas

- Araújo M, New M (2007) Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in Ecology and Evolution*, 22(1): 42-47.
- Engler R, Guisan A, Rechsteiner L (2004) An improved approach for predicting the distribution of rare and endangered species from occurrence and pseudo-absence data. *Journal of Applied Ecology*, 41(22): 263-274.
- IPCC (2007) IPCC Fourth Assessment Report - Climate Change 2007: The Physical Science Basis Summary for Policymakers.
- Kuhn K, Campbell-Lendrum D, Davies C (2002) A Continental Risk Map for Malaria Mosquito (Diptera: *Culicidae*) Vectors in Europe. *Journal of Medical Entomology*,

- 39(4): 621-630.
- Lindsay S, Parson L, Thomas C (1998) Mapping the ranges and relative abundance of the two principal African malaria vectors, *Anopheles gambiae* sensu stricto and *An. arabiensis*, using climate data. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 265(1399): 847-854.
- Martens P, Kovats R, Nijhof S, Vries P, Livermore M, Bradley D, Cox J, McMichael A (1999) Climate change and future populations at risk of malaria. *Global Environmental Change*, 9(1): 89-107.
- Minář J, Halgoš J, Bartalová A, Jalili N (2007) Current climatic change and its impact on mosquito fauna in conditions of Slovakia and Czech Republic. *Acta Zoologica Universitatis Comenianae*, 47(2): 177-182.
- Muturi J, Burgess P, Novak R (2008) Malaria vector management: where have we come from and where are we headed?. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 78(4): 536–537.
- Paaijmans K, Wandago M, Githeko A, Takken W (2007) Unexpected high losses of *Anopheles gambiae* larvae due to rainfall. *Plos One*, 2(11).
- Patz J, Olson S (2006) Malaria risk and temperature: Influences from global climate change and local land use practices. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(15): 5635-5636.
- Pearson R, Dawson T (2003) Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful?. *Global Ecology and Biogeography*, 12(5): 361-371.
- Pearson R, Thuiller W, Araújo M, Martinez-Meyer E, Brotons L, Mcclean C, Miles L, Segurado P, Dawson T, Lees D (2006) Model-based uncertainty in species range prediction. *Journal of Biogeography*, 33(10): 1704-1711.
- Ramsdale C, Snow K (2000) Distribution of the genus *Anopheles* in Europe. *European Mosquito Bulletin*, 7: 1-26.
- Ribeiro H, Ramos H, Pires C, Capela R, (1998) An annotated checklist of the mosquitoes of continental Portugal (Diptera *Culicidae*). *Actas do III congresso Ibérico de entomologia*: 233-253.