

## CAPÍTULO 2 | CHAPTER 2

# A VALIDAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE ESPÉCIES ATRAVÉS DE MODELOS PREDITIVOS: CASOS DE ESTUDO PARA A ILHA DA MADEIRA

## USING PREDICTIVE MODELS OF SPECIES DISTRIBUTION TO VALIDATE BIODIVERSITY DATA: CASE STUDIES FOR MADEIRA ISLAND

Alberto Jiménez-Valverde<sup>1,2\*</sup>, Joaquín Hortal<sup>3</sup>, Jorge M. Lobo<sup>2</sup>, Paulo A. V. Borges<sup>1</sup>,  
Cristina Abreu<sup>4</sup>, António Franquinho Aguiar<sup>5</sup>, Eduardo Brito de Azevedo<sup>6</sup>,  
Mário Boieiro<sup>7</sup>, Susana Fontinha<sup>8</sup>, Roberto Jardim<sup>9</sup>, Paulo Oliveira<sup>8</sup>, Cecília Sérgio<sup>10</sup>,  
Artur R. M. Serrano<sup>7</sup>, Manuela Sim-Sim<sup>11</sup> & Duarte Nunes<sup>12</sup>

<sup>1</sup> Universidade dos Açores, Dep. de Ciências Agrárias – CITA-A (Grupo de Biodiversidade dos Açores), Terra-Chã, 9700-851 Angra do Heroísmo, Terceira, Açores, Portugal; \*e-mail: mcna651@mncn.csic.es.

<sup>2</sup> Departamento de Biodiversidad y Biología Evolutiva, Museo Nacional de Ciencias Naturales, C/ José Gutiérrez Abascal, 2, 28006 Madrid, Spain.

<sup>3</sup> NERC Centre for Population Biology, Division of Biology, Imperial College London, Silwood Park Campus, Ascot, Berkshire SL5 7PY, UK.

<sup>4</sup> Universidade da Madeira, Dep. Biologia/CEM, Edifício da Penteada, 9000-399 Funchal, Portugal.

<sup>5</sup> Núcleo de Entomologia, Laboratório Agrícola da Madeira, Caminho dos Caboucos 61, 9135-372 Camacha, Madeira, Portugal.

<sup>6</sup> Universidade dos Açores, Dep. de Ciências Agrárias – CMMG (Centro de Estudos do Clima, Meteorologia e Mudanças Globais), Terra-Chã, 9700-851 Angra do Heroísmo, Terceira, Açores, Portugal.

<sup>7</sup> Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Centro de Biologia Ambiental, Departamento de Biologia Animal, R. Ernesto de Vasconcelos, Ed. C2, 2º Piso, Campo Grande, 1749-016 Lisboa, Portugal.

<sup>8</sup> Parque Natural da Madeira/CEM, Quinta do Bom Sucesso, Caminho do Meio, 9050-251 Funchal, Madeira, Portugal.

<sup>9</sup> Jardim Botânico da Madeira, Caminho do Meio, 9064-512 Funchal, Portugal.

<sup>10</sup> Jardim Botânico, Museu Nacional de História Natural, Universidade de Lisboa, Centro de Biologia Ambiental, R. da Escola Politécnica, 58, 1250-102 Lisboa, Portugal.

<sup>11</sup> Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências (DBV – Dep. de Biologia Vegetal), CBA – Centro de Biologia Ambiental, R. Ernesto de Vasconcelos, Ed. C2, Campo Grande, 1749-016 Lisboa, Portugal.

<sup>12</sup> Direção Regional do Ambiente, Rua Dr. Pestana Júnior, nº 6 – 3º Direito, 9064-506 Funchal, Madeira, Portugal.

### Resumo

1. Os modelos preditivos de distribuição de espécies são uma importante ferramenta para lidar com a falta de informação biogeográfica existente para a maior parte dos *taxa*. Com esta técnica, estabelece-se uma relação entre a variável dependente (presença/ausência de uma espécie) e um conjunto de variáveis potencialmente predictoras, e é criado um mapa com a probabilidade de presença da espécie para uma determinada área de interesse.
2. Neste capítulo, é usado o programa *Maxent* para criar modelos de distribuição potencial de um conjunto selecionado de espécies, e os resultados obtidos são discutidos com base no conhecimento de especialistas nessas espécies.

### Abstract

1. Predictive models of species distribution emerge as a valuable tool for tackling the lack of distributional information on most *taxa*. A function between the dependent variable (presence/absence of the species) and a set of potential predictors is established, and a map is generated for the focus area, indicating the probability of presence of the species.
2. In this chapter, we use *Maxent* to develop potential distribution models for a number of selected species and we discuss the results on the basis of expert knowledge.
3. Some sources of uncertainty are mentioned, and the impossibilities of accounting for historical processes or variables acting at a very local scale are highlighted.

3. Existem várias limitações no uso dos modelos preditivos de distribuição (discutidos neste capítulo), entre as quais, a incerteza nas fontes de informação e a impossibilidade de ter em conta variáveis ou processos históricos que actuam à escala local.
4. Apesar das limitações, os modelos preditivos contribuem para entender os padrões de distribuição das espécies e ajudam a localizar novas áreas onde se deve fazer amostragem. Uma utilização cautelosa destas técnicas pode ajudar a melhorar o nosso conhecimento acerca de *taxa* pouco estudados.

## 1. Introdução

A extinção de espécies é uma realidade inquestionável (Pimm *et al.* 1995; Lawton & May 1995; Dye & Tuggle 1998; Chapin *et al.* 2000; Biber 2002; Dunn 2005). As estimativas mais conservadoras prevêem que todas as espécies estarão extintas dentro de alguns séculos (Stork 1997; Pimm & Raven 2000). O ritmo de extinção maciça é tão elevado que os cientistas crêem que estamos perante uma crise de biodiversidade (Chapin *et al.* 2000). A situação é particularmente preocupante para *taxa* como os insectos, cuja hiper-diversidade impede que se consiga o conhecimento necessário em tempo útil para proteger essas espécies (Hammond 1994; Dunn 2005). As alterações na biodiversidade não são facilmente reversíveis e alteram dramaticamente o funcionamento dos ecossistemas, com consequências sociais e económicas marcantes (Chapin *et al.* 2000; Balmford & Bond 2005; Mace *et al.* 2005; Wallace 2007; <http://www.millenniumassessment.org/>). Como referiu Edward O. Wilson, galardoado com um prémio Crafoord (o equivalente aos prémios Nobel em ecologia e evolução): “Não consigo pensar num problema científico [a extinção] de maior importância e urgência para a humanidade” (Wilson 2001, p. 242).

Para preservar a biodiversidade, é necessário conhecer a distribuição (Dobson *et al.* 1997; Howard *et al.* 1998; van Jaarsveld *et al.* 1998; Araújo & Williams 2000) e a abundância (Gaston *et al.* 1997; Gaston & Blackburn 2000) das espécies. Para além disso, é também necessário compreender as causas dos padrões de distribuição actuais das diversas formas de vida. Isto permitirá a implementação de medidas de conservação com base numa sólida compreensão do fenómeno da biodiversidade e da sua crise actual. A distribuição dos organismos é, no entanto, um fenómeno complexo e dinâmico, determinado por um grande número de processos, cuja contribuição varia consoante os gradientes geográficos e a escala espacial de análise. Para além disso, a informação relativa à distribuição de espécies é muitas vezes escassa, o que produz uma imagem enviesada e fragmentada (limitada no espaço e no tempo) da “verdadeira” distribuição da maior parte das espécies. Existe, todavia, alguma informação disponível a diferentes escalas espaciais e temporais para algumas espécies ameaçadas. No entanto, frequentemente, quanto mais detalhada for a resolução, maior é o

4. In spite of their limitations, distribution models provide useful insights into the distribution patterns of the species and help to locate new areas to survey. A cautionary use of these techniques may help to improve our understanding of relatively poorly known *taxa*.

## 1. Introduction

Species extinctions are an undeniable reality (Pimm *et al.* 1995; Lawton & May 1995; Dye & Tuggle 1998; Chapin *et al.* 2000; Biber 2002; Dunn 2005). The most conservative estimates foresee all species being lost in a few centuries (Stork 1997; Pimm & Raven 2000). The speed of massive extinction is so high that most scientists agree that we are facing an enormous biodiversity crisis (Chapin *et al.* 2000). The situation is especially worrisome for hyperdiverse *taxa*, such as insects; their overwhelming diversity makes it impossible to understand everything we need for their protection before it is too late (Hammond 1994; Dunn 2005). Changes in biodiversity are not easily reversible and alter ecosystem functioning dramatically, with important social and economic consequences (Chapin *et al.* 2000; Balmford & Bond 2005; Mace *et al.* 2005; Wallace 2007; <http://www.millenniumassessment.org/>). In the words of the Crafoord Prize winner (the equivalent to the Nobel Prize in ecology and evolution) Edward O. Wilson: “I cannot imagine a scientific problem of greater immediate importance for humanity” (Wilson 2001, p. 242).

Preserving biodiversity requires knowledge of the distribution (Dobson *et al.* 1997; Howard *et al.* 1998; van Jaarsveld *et al.* 1998; Araújo & Williams 2000) and abundance (Gaston *et al.* 1997; Gaston & Blackburn 2000) of species. Furthermore, it is also necessary to understand the causes of the current patterns of distribution of the diverse life forms. This will allow nature conservation to be based on a solid comprehension of both the phenomenon of biodiversity and its current crisis. However, the distribution of organisms is a complex and dynamic phenomenon determined by numerous processes, the relevance of which varies along geographical gradients and according to the spatial scale of analysis. In addition, distributional information is frequently scarce, commonly offering a biased and fragmentary picture of the “true” distribution over a limited spatial and temporal snapshot for almost all species. Although for some endangered flag-species distributional information can be available at some scales, the more detailed the resolution, the greater the number of gaps in the maps (Hurlbert & Jetz 2007). In the same way, the smaller in size the species, the less is known about its distribution. So, considering that insects are more than 50% of all known living organisms on earth (Wilson 2001) – and

número de lacunas nos mapas (Hurlbert & Jetz 2007) e, da mesma forma, quanto menor a dimensão de uma espécie, menos se conhece acerca da sua distribuição. A extensão do problema torna-se particularmente evidente quando se tem em consideração que os insectos, de menores dimensões, correspondem a mais de 50% do número total de indivíduos (Wilson 1992) e a mais de 70% do número total de espécies de todos os organismos vivos conhecidos no planeta terra. O desconhecimento geral acerca dos padrões geográficos da diversidade biológica é, talvez, um obstáculo incontornável face a esta dimensão da biodiversidade e às limitações humanas. Sendo assim, como podemos proteger o desconhecido?

## 2. Mapeamento da biodiversidade na Macaronésia – a base de dados ATLANTIS

Os dados acerca da distribuição de espécies são normalmente a única informação disponível para descrever padrões geográficos de biodiversidade. A compilação da informação acerca da distribuição de espécies tem sido precisamente um dos objectivos principais dos projectos INTERREG IIIB ATLÂNTICO (ver Borges 2005) e INTERREG IIIB BIONATURA (ver <http://www.interreg-bionatura.com/biodiv/bancodatos.php>; [www.azoresbioportal.angra.uac.pt](http://www.azoresbioportal.angra.uac.pt)).

Nas ilhas Canárias, a criação de uma base de dados da biodiversidade terrestre do arquipélago começou em 1998 (Projecto BIOTA) e culminou na publicação de uma lista completa de fungos, flora e fauna deste arquipélago (ver Izquierdo *et al.* 2001). O governo das Canárias desenvolveu um programa de computador (Atlantis Tierra 2.0) para compilar e analisar a distribuição espacial de biota terrestres (ver Borges, 2005). Este software foi escrito na linguagem de programação Visual Basic, usa a linguagem SQL para fazer consultas de dados relacionais e tem uma fácil interface com todos os programas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). No arquipélago da Madeira, a implementação de uma base de dados de biodiversidade usando o programa Atlantis Tierra 2.0 começou em 2004 e está neste momento a ser actualizada.

Existem várias vantagens no uso deste *software* para a melhoria do conhecimento da biodiversidade da Madeira, nomeadamente (ver também Borges 2005):

- 1) toda a informação actualmente dispersa por centenas de publicações estará concentrada numa base de dados em SQL, que estará disponível através de um *software* de fácil utilização;
- 2) a base de dados está organizada de modo a que toda a informação (taxonómica e espacial) é anexada a um documento (inclui todo o tipo de publicações em taxonomia e também relatórios que, não tendo sido publicados, foram validados por um taxonomista coordenador);
- 3) vários campos de informação relacionados com gestão de conservação vão sendo introduzidos e poderão ser filtrados no processo de análise, nomeadamente o tipo de colonização da espécie (endémica do arquipélago ou da Macaronésia, nativa, introduzida), o habitat onde

they might even be more than 70% of all species – the extent of the problem is evident. Given the dimension of biodiversity and human limitations, our general ignorance about the geographic patterns of biological diversity may be an unavoidable obstacle, leading us to ask how to protect the unknown.

## 2. Mapping biodiversity on Macaronesia – ATLANTIS database

Usually data on the distribution of species provide the only information available to describe geographic patterns of biodiversity. The compilation of information about species distribution is one of the main aims of Project INTERREG IIIB ATLÂNTICO (see Borges 2005) and Project INTERREG IIIB BIONATURA (see <http://www.interreg-bionatura.com/biodiv/bancodatos.php>; [www.azoresbioportal.angra.uac.pt](http://www.azoresbioportal.angra.uac.pt)).

In the Canary Islands, the creation of a database of terrestrial biodiversity started in 1998 (Project BIOTA) and culminated in the publication of a comprehensive list of the Canarian Fungi, Flora and Fauna (see Izquierdo *et al.* 2001). The Government of the Canary Islands created a software program (Atlantis Tierra 2.0) to compile and analyse the spatial distribution of terrestrial biota (see Borges 2005). This software was written in Visual Basic, using a common database environment; it uses the SQL language to develop interrogation queries and has an easy interface with all GIS software. In the Madeiran archipelago the implementation of the biodiversity database, using the Software Atlantis Tierra 2.0, started in 2004 and is currently being updated.

The advantages of this software for the improvement of the Madeiran biodiversity knowledge are as follows (see also Borges 2005):

- 1) all the information on species biology dispersed in hundreds of publications will be concentrated in a database that will be easily accessible through a user-friendly software;
- 2) the database is organised in a way that all information (taxonomic and spatial) is linked to a document (all types of taxonomic works, but also unpublished findings when validated by a Coordinating taxonomist);
- 3) various areas of information related to conservation management can be introduced and filtered in the analysis process, namely the colonisation status of a species (endemic to Madeira, endemic to Macaronesia, native, introduced), its habitat of occurrence, and the conservation status (endangered, vulnerable, etc.);
- 4) Data by-products will allow diverse follow-up studies beyond the inventory process, using for instance predictive models (e.g. Hortal *et al.* 2005; this chapter).

---

ocorre ou o seu estatuto de conservação (ameaçada, vulnerável, etc.);

- 4) os dados permitirão estudos subsequentes para além do processo de inventariação, utilizando, por exemplo, modelos preditivos (e.g. Hortal *et al.* 2005; este capítulo).

### 3. À procura de um atalho: modelos preditivos de distribuição de espécies

Os modelos preditivos são utilizados para interpolar (*i.e.* formular hipóteses de distribuição dentro dos parâmetros espaciais, ambientais e/ou temporais dos dados analisados) e para extrapolar (*i.e.* prever a distribuição fora dos parâmetros utilizados) a distribuição observada de espécies em territórios para os quais não existe informação. Na prática, os modelos preditivos são funções que relacionam a característica (atributo) que interessa com um número de variáveis explicativas ou predictoras (Nicholls 1989; Ferrier 2002; Ferrier *et al.* 2002a,b). Desenvolvimentos recentes nos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) tornaram possível o armazenamento, gestão e análise quantitativa de um grande número de dados espaciais (Johnston 1998), o que possibilitou a disponibilização de informação acerca de variáveis ambientais para cada localidade do território. São realizadas análises estatísticas para determinar a relação, sob a forma de um modelo matemático, entre as variáveis ambientais e os dados de distribuição das espécies. O modelo pode ser, então, interpolado ou extrapolado para o território que se pretende conhecer usando informação disponível, digitalizada, das variáveis ambientais. O resultado é um mapa preditivo da distribuição da espécie estudada para o território de interesse (Fig. 1, Guisan & Zimmermann 2000; Scott *et al.* 2002). As funções matemáticas e os padrões geográficos preditivos de distribuição podem ajudar a entender os processos que determinam esses padrões. No entanto, estes modelos estatísticos são apenas correlativos, sendo apenas possível obter sugestões dos processos envolvidos e não explicações para os padrões.

Os modelos preditivos de distribuição de espécies receberam uma grande atenção nas últimas duas décadas, dada a sua potencialidade para ultrapassar a falta de informação correcta sobre a distribuição de espécies. Os modelos têm sido usados para explorar um grande número de questões. A aplicação mais geral até à data é a quantificação e a análise da relação entre a presença (e a ausência) de uma espécie e um conjunto de variáveis potencialmente explicativas; de forma a estimar os factores que poderão afectar em maior escala a distribuição da espécie ou prever os efeitos das alterações futuras desses factores na distribuição da espécie (Gibson *et al.* 2004; Eyre & Buck 2005; Sánchez-Cordero *et al.* 2005; Hortal *et al.* 2005; Jiménez-Valverde & Lobo 2006; Seoane *et al.* 2006). Os modelos preditivos também têm sido utilizados para explorar hipóteses ecológicas, biogeográficas e evolutivas (Peterson *et al.* 1999; Anderson *et al.* 2002; Peterson & Holt 2003; Chefaoui *et al.* 2005; Wiens & Graham 2005; Lobo *et al.* 2006; Jiménez-Valverde & Lobo 2007; Jiménez-Valverde *et al.* 2007, 2008);

### 3. Searching for a shortcut: predictive models of species distribution

Predictive models are techniques used to interpolate (*i.e.* draw distribution hypotheses within the spatial, environmental and/or temporal universe defined by the set of training data points), and extrapolate (*i.e.* draw distribution hypotheses outside of the spatial, environmental and/or temporal universe defined by the set of training data points) the observed distribution of the species in territories without information. They are functions that relate the attribute of interest with a number of explanatory variables or predictors (Nicholls 1989; Ferrier 2002; Ferrier *et al.* 2002a,b). Current developments in Geographic Information Systems (GIS) have made the storage, management and quantitative analysis of huge amounts of spatial data possible (Johnston 1998). Environmental information is available for each locality on the territory. These variables and distributional data are submitted to statistical analyses in order to formalise their relationship via a mathematical model. This model can be interpolated or extrapolated to the desired territory thanks to the digital layers available, generating a predictive map of the distribution of the studied species on the territory of interest (Fig. 1, Guisan & Zimmermann 2000; Scott *et al.* 2002). These mathematical functions and the predicted geographic patterns of distribution can help to understand some of the underlying processes that shape a species' distribution. However, these statistical models are strictly correlative and, as such, supply no explanations; rather, they only suggest them.

Species distribution models have received special attention in the last two decades because they constitute an attractive possibility to overcome our lack of reliable information about the distribution of species. The predictions of these models have been used to explore a great number of questions. The most general application so far has been to quantify and analyse the relationships between a species' presence (and absence) and a number of potentially explanatory variables in order to estimate the most relevant factors affecting its distribution or to predict the effects of future changes in these factors on the distribution of the species (Gibson *et al.* 2004; Eyre & Buck 2005; Sánchez-Cordero *et al.* 2005; Hortal *et al.* 2005; Jiménez-Valverde & Lobo 2006; Seoane *et al.* 2006). Species distribution models have also been used to explore ecological, biogeographic and evolutionary hypotheses (Peterson *et al.* 1999; Anderson *et al.* 2002; Peterson & Holt 2003; Chefaoui *et al.* 2005; Wiens & Graham 2005; Lobo *et al.* 2006; Jiménez-Valverde & Lobo 2007; Jiménez-Valverde *et al.* 2007, 2008), to forecast the effects of climate change on species distributions (Peterson 2003a; Thuiller *et al.* 2005), to predict the geogra-



al. 2007, 2008), para prever os efeitos das alterações climáticas na distribuição de espécies (Peterson 2003a; Thuiller *et al.* 2005), para prever as áreas geográficas onde populações de espécies invasoras se poderão estabelecer (Peterson & Vieglais 2001; Peterson 2003b), para a seleção de reservas naturais (Araújo & Williams 2000; Cabeza *et al.* 2004; Sánchez-Cordero *et al.* 2005) e várias outras aplicações (ver Guisan & Thuiller 2005 para uma revisão do tema). Os resultados de modelações têm sido inclusivamente utilizados para identificar áreas (para as quais se tem pouca informação) onde se deverá desenvolver trabalho no futuro (Jiménez-Valverde *et al.* 2006; Richardson *et al.* 2006). Em concordância com o seu uso a tão grande escala, foi provado que os mapas preditivos são mais fiáveis do que os mapas de distribuição publicados em atlas ou guias de campo (Bustamante & Seoane 2004) e também mais fiáveis do que os modelos baseados em peritos na área (Seoane *et al.* 2005; mas ver Pearce *et al.* 2001; McPherson & Jetz 2007). Apesar das limitações, e desde que usados com cautela, os modelos preditivos são uma poderosa ferramenta de trabalho para criar hipóteses e explorar padrões de distribuição de espécies a partir de dados incompletos.

#### 4. Aplicação do Maxent a espécies da ilha da Madeira

A técnica de modelação por máxima entropia (*Maxent* 3.0.3; Phillips *et al.* 2004, 2006) foi aplicada a um conjunto seleccionado de espécies da ilha da Madeira para (1) criar mapas com hipóteses de distribuição de espécies, (2) identificar as áreas onde, no futuro, se deverá aplicar um esforço de amostragem maior e (3) estabelecer a influência de potenciais variáveis determinantes para a distribuição das espécies. O *Maxent* prediz a distribuição de uma espécie através da probabilidade de distribuição por máxima entropia, usando os dados conhecidos de presença de espécies (definida pelos pixels ocupados). O método requer apenas dados de presença de espécies e a determinação da probabilidade óptima de distribuição é feita através de algoritmos (Phillips *et al.* 2006). O *Maxent* tem sido recomendado em estudos comparativos de modelos preditivos (e.g. Elith *et al.* 2006) e tem mostrado resultados úteis com amostras pequenas (Hernández *et al.* 2006).

##### 4.1. Espécies estudadas

###### Bríofitos

Na ilha da Madeira, os bríofitos ocorrem em quase todos os locais, desde as zonas áridas costeiras até à floresta e áreas mais altas de montanha. É, no entanto, na floresta Laurissilva que os bríofitos ocorrem em maior abundância, diversidade e proporção de espécies endémicas. Num clima constante nas regiões mais altas das ilhas da Macaronésia com floresta Laurissilva (ilhas Canárias, Açores, Madeira), uma flora relíquia com origem na Era Terciária conseguiu sobreviver e resistir impune às glaciações do Pliocénio e à desertificação do Norte de África. A flora relíquia, junta-

phic areas where invasive species could establish successful populations (Peterson & Vieglais 2001; Peterson 2003b), and for the selection of nature reserves (Araújo & Williams 2000; Cabeza *et al.* 2004; Sánchez-Cordero *et al.* 2005), among other applications (see Guisan & Thuiller 2005 for an overview). Model results have been used even to identify areas without information where future studies should be carried out, starting from poor and biased distributional data (Jiménez-Valverde *et al.* 2006; Richardson *et al.* 2006). In support of their widespread use, prediction maps have sometimes been found to provide a more reliable picture of species distributions than maps published in atlas and field guides (Bustamante & Seoane 2004) and expert-based models (Seoane *et al.* 2005; but see Pearce *et al.* 2001; McPherson & Jetz 2007). In spite of their problems, species distribution models are a useful tool to generate testable hypotheses and to explore distribution patterns from incomplete data, provided that they are used with caution and awareness of their limitations.

#### 4. Applying Maxent to selected species in Madeira Island

We modelled the potential distributions of a set of selected species for Madeira Island using maximum entropy modelling (*Maxent* 3.0.3; Phillips *et al.* 2004, 2006), in order to (1) elaborate distributional hypotheses, (2) identify new areas where to focus future survey efforts and (3) recognise the relative influence of a number of potential determinants of the distributions of the species. *Maxent* is a machine learning method that fits the probability distribution of maximum entropy for presences, constrained by the values of the pixels where the species has been found. The method requires presence-only data, and the convergence to the optimal probability is guaranteed by the deterministic algorithms (Phillips *et al.* 2006). *Maxent* has been recommended in recent model comparisons (e.g. Elith *et al.* 2006), and has been found to produce useful results with especially small sample sizes (Hernández *et al.* 2006).

##### 4.1. The species

###### Bryophytes

In Madeira, bryophytes occur almost everywhere, from the arid areas of the seashore to the higher mountains and forest, and it is in the Laurel forest that the highest coverage, diversity and percentage of endemic species occur. Thanks to the Laurel forest, a relict Flora of Tertiary origin was able to survive in the favourable climate of the mountainous regions on the Lauri-Macaronesian archipelagos (Canary Islands, Azores, Madeira), to a large extent unaffected by the ice ages of the Pliocene and the desertification of northern Africa. The Laurel forests are characterised by relict spe-

mente com novos endemismos de flora que se foram originando, contribuí para a grande riqueza de espécies de espermatófitas (plantas com sementes) e de briófitos que ocorrem actualmente na Macaronésia.

O conhecimento actual da brioflora da Madeira permite-nos analisar os resultados da modelação da distribuição de algumas espécies. Foram seleccionadas três espécies de briófitos para este estudo, duas das quais associadas à floresta Laurissilva, mas com necessidades ecológicas distintas (*Plagiochila stricta* e *Porella inaequalis*), e outra espécie presente em zonas secas costeiras (*Exormotheca pustulosa*). Com a análise destas espécies, pretende-se entender os factores ambientais que restringem a sua distribuição e as razões que levam ao seu padrão de distribuição actual. Por outro lado, conhecer a distribuição provável de uma espécie permite dirigir os esforços de investigação para áreas onde a sua ocorrência é mais provável e, assim, melhorar os dados de biologia e estatuto de conservação da espécie (Sérgio *et al.* 2007). Os dados de distribuição actual utilizados neste estudo provêm de trabalho de campo desenvolvido a partir de 1995, no âmbito de vários projectos.

- ***Exormotheca pustulosa*** Mitt. (Exormothecaceae) (Fig. 2a) é uma hepática termófila e xerófila. Ocorre em solos pobres, maioritariamente em pastagens e matas mediterrânicas. Pode ocupar pequenas áreas húmidas, colonizar áreas secas expostas em solos ácidos ou estabelecer-se perto do mar em áreas mais ou menos expostas. É uma espécie sub-mediterrânica, não muito frequente na Europa. Está restrita a poucos locais na área mediterrânea, nomeadamente Portugal, Espanha, Itália, Sicília e Marrocos. Ocorre também nas ilhas Canárias e na Madeira. Foi também considerada por Bischler (2004) como uma espécie característica de clima mediterrânico seco.
- ***Plagiochila stricta*** Lindenb. (Plagiochilaceae) (Fig. 2b). Não é raro encontrar esta espécie em fragmentos de Laurissilva nas encostas Norte da ilha da Madeira. A espécie ocorre entre os 550 m e os 1000 m de altitude, onde a precipitação é superior a 3000 mm/ano e o nível de humidade ao longo do ano é alto (75-90%). A espécie cresce preferencialmente em encostas sombreadas ao longo de pequenos cursos de água, formando tapetes mistos ou contínuos. Também já foi encontrada nos troncos (casca) de *Persea indica*. A maior parte das plantas vasculares que ocorrem na proximidade são endémicas, relíquias ou ameaçadas mundialmente, tais como *Woodwardia radicans*, *Aichryson divaricatum*, *Hypericum grandifolium*, *Sibthorpia peregrina* e *Tolpis macrorhiza*. *P. stricta* desenvolve-se em associação com outros taxa do género *Plagiochila*, sobretudo com a espécie *P. bifaria*. Também já foi observada a sua associação com *Lejeunea eckloniana*, *L. lamacerina*, *Porella canariensis*, *Andoa berthelotiana*, *Echinodium prolixum*, *E. spinosum*, *Fissidens luisierii* e *Thamnobryum maderense*. A espécie apresenta uma distribuição geográfica maioritariamente neotropical-atlântica, pertencendo a um grupo taxonó-

cies probably existing since the Tertiary, that, together with neo-endemics, arose on the geographically isolated isles in more recent times, contributing to the high species richness of phanerogams, but also of bryophytes in Macaronesia.

The in-depth data for the Madeiran bryoflora allows us to analyse and comment on the results achieved by modelling the distribution of particular species. Three species were selected; two of them associated with Laurissilva, but with distinct ecological requirements (*Plagiochila stricta* and *Porella inaequalis*), the other species (*Exormotheca pustulosa*) being from dry coastal zones. By selecting these species we intend to explore the environmental factors that constrain their distribution, which might help to explain their distribution pattern. Also, by modelling the distribution of a species we can focus our research efforts on specific areas where the occurrence of this species is highly probable, allowing us to improve our biological data and conservation status of the species (Sérgio *et al.* 2007). The data used in the simulation was obtained mainly from fieldwork carried out after 1995 within several research projects.

- ***Exormotheca pustulosa*** Mitt. (Exormothecaceae) (Fig. 2a) is a thermophilous and sub-mediterranean element, not very frequent in Europe, occurring on poorly developed soil, mostly on Mediterranean grasslands and shrublands. It is a xerophytic species growing in small patches in damp to temporarily dry exposed areas in pioneer communities on open acidic soils, in more or less exposed conditions, by the sea. It is restricted to very few sites in the Mediterranean area: Portugal, Spain, Italy, Sicily, Morocco, as well as Canary Islands and Madeira. This liverwort was also considered by Bischler (2004) to be a species characteristic of dry Mediterranean climate.
- ***Plagiochila stricta*** Lindenb. (Plagiochilaceae) (Fig. 2b) is abundant in the Laurissilva on the northern slopes of Madeira. It occurs mainly between 550-1000 m.a.s.l., where the rainfall is greater than 3,000 mm per year and the humidity level is high during the entire year (75-90%). This species grows mainly on the shaded slopes located along-side rivulets, forming scattered or pure mats. It was also found on the bark of *Persea indica*. Most of the vascular plants growing on the vicinity are endemics, relics or species threatened on a worldwide basis, such as *Woodwardia radicans*, *Aichryson divaricatum*, *Hypericum grandifolium*, *Sibthorpia peregrina* and *Tolpis macrorhiza*. *Plagiochila stricta* develops in association with other *Plagiochila* taxa, especially *P. bifaria*. It has also been found associated with *Lejeunea eckloniana*, *L. lamacerina*, *Porella canariensis*, *Andoa berthelotiana*, *Echinodium prolixum*, *E. spinosum*, *Fissidens luisierii* and *Thamnobryum maderense*. This species shows a mainly neotropical-Atlantic geographic distribution, belonging to a taxonomic section with the highest diversity in mountainous regions of South America.
- ***Porella inaequalis*** (Gottsche ex Steph.) Perss. (Porellaceae) (Fig. 2c) is a rare foliose endemic species and mainly occurs on the northern slopes of the Laurissilva of Madei-

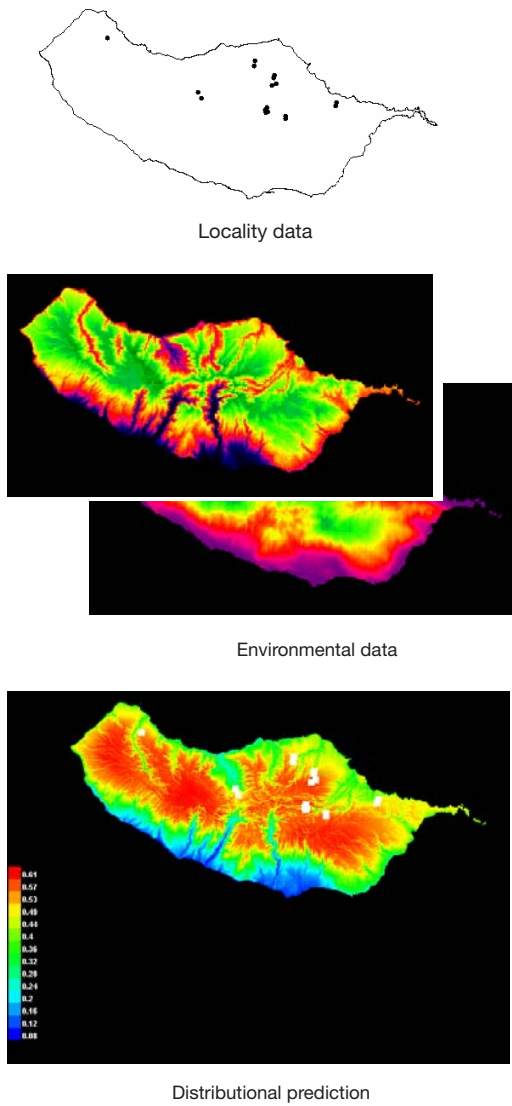


Figura 1. Processo de modelação da distribuição de uma espécie usando variáveis ambientais armazenadas digitalmente como preditoras num Sistema de Informação Geográfica. Os dados de distribuição geo-referenciados são relacionados estatisticamente com as variáveis preditoras através de um algoritmo matemático. Finalmente, a distribuição dessa relação é interpolada para todo o território.

Figure 1. Modelling process for the distribution of one species using environmental variables digitally stored in a Geographic Information System as predictors. The georeferenced distribution data are statistically related to these predictors through a mathematical algorithm, and the distribution of such relationship is finally extrapolated to the whole territory.

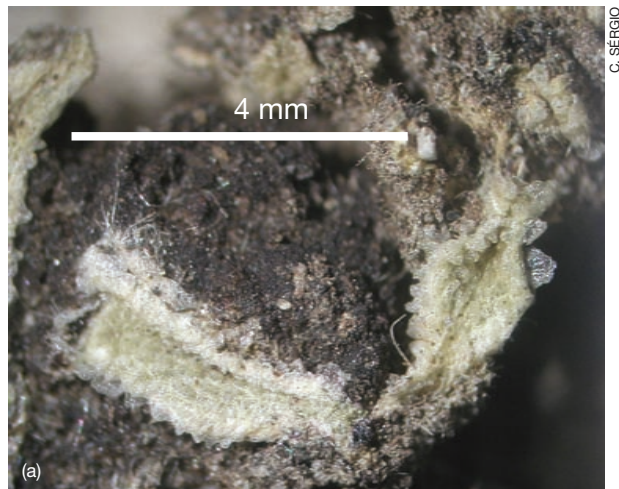


Figura 2. Espécies de briófitos seleccionadas para este estudo: *Exormotheca pustulosa* (a), *Plagiochila stricta* (b) e *Porella inaequalis* (c).

Figure 2. The bryophyte species *Exormotheca pustulosa* (a), *Plagiochila stricta* (b) and *Porella inaequalis* (c).



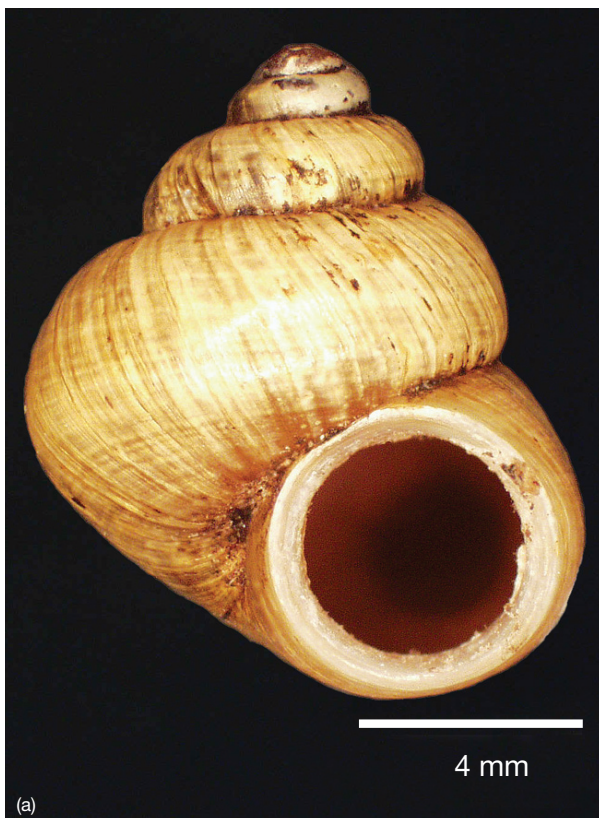


OLGA BAETA - JARDIM BOTÂNICO DA MADEIRA



OLGA BAETA - JARDIM BOTÂNICO DA MADEIRA

Figura 3. Plantas vasculares utilizadas neste estudo: *Chamaemeles coriacea* (a) e *Convolvulus massonii* (b).  
Figure 3. The vascular plant species *Chamaemeles coriacea* (a) and *Convolvulus massonii* (b).



DINARTE TEIXEIRA



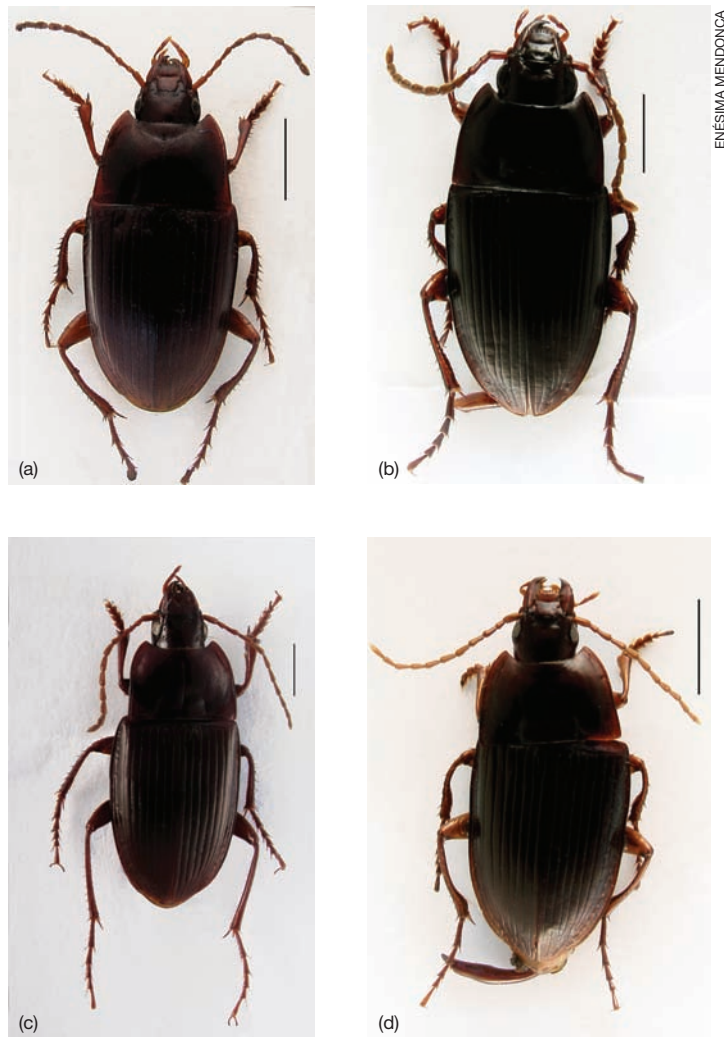
VIRGILIO GOMES



VIRGILIO GOMES

Figura 4. Moluscos seleccionados para este estudo: *Craspedopoma mucronatum* (a), *Leptaxis groviana groviana* (b) e *Plutonia marcida* (c).  
Figure 4. The selected mollusc taxa *Craspedopoma mucronatum* (a), *Leptaxis groviana groviana* (b) and *Plutonia marcida* (c).





ENESIMA MENDONÇA

Figura 5. Espécies de carábidos consideradas neste estudo: *Orthomus curtus* (a), *Orthomus dilaticollis* (b), *Orthomus gracilipes* (c) e *Orthomus susanae* (d). (Escala: 2,0 mm).  
 Figure 5. The ground-beetle species *Orthomus curtus* (a), *Orthomus dilaticollis* (b), *Orthomus gracilipes* (c) and *Orthomus susanae* (d). (Scale: 2,0 mm).



A. FRANQUINHO AGUIAR

Figura 6. Espécies de borboletas seleccionadas para este estudo: *Gonepteryx maderensis* (a) e *Hipparchia maderensis* (b).  
 Figure 6. The butterfly species *Gonepteryx maderensis* (a) and *Hipparchia maderensis* (b).



(a)



(b)



(c)

Figura 7. Aves consideradas neste estudo: *Anthus berthelotii madeirensis* (a), *Carduelis chloris madeirensis* (b) e *Carduelis cannabina guentheri* (c).  
Figure 7. The bird taxa *Anthus berthelotii* (a), *Carduelis chloris madeirensis* (b) and *Carduelis cannabina guentheri* (c).



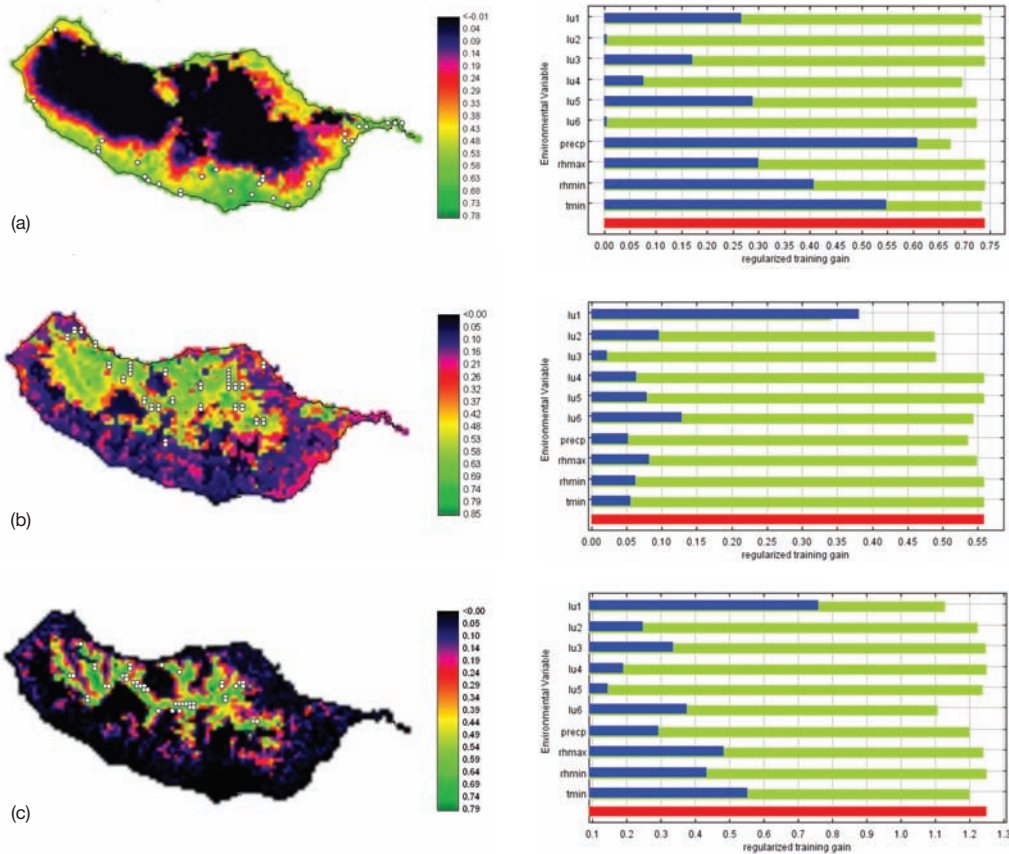


Figura 8. Distribuição potencial de *Exormotheca pustulosa* (a) *Plagiochila stricta* (b) e *Porella inaequalis* (c) na ilha da Madeira (mapas). Os gráficos apresentam os resultados da avaliação de *jackknife* acerca da importância relativa dos preditores (modelos sem variável a verde, com apenas a variável a azul e com todas as variáveis a vermelho).

Figure 8. The maps show the potential distribution of *Exormotheca pustulosa* (a) *Plagiochila stricta* (b) and *Porella inaequalis* (c) in Madeira Island. The graphs display the results of the jackknife evaluation of relative importance of predictors (green, without variable; blue, with only the variable; red, with all variables).

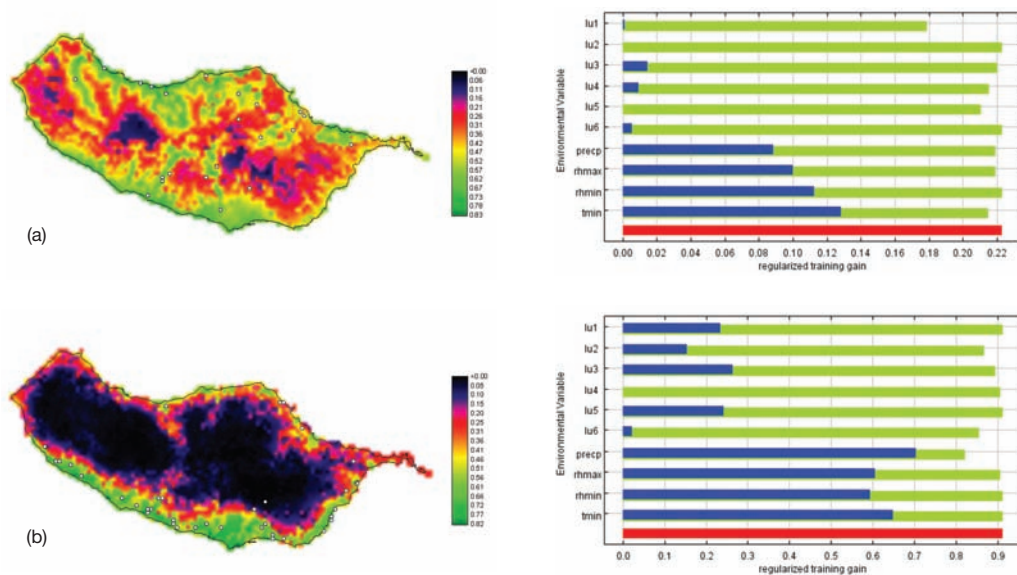
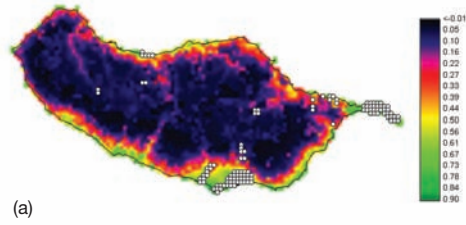


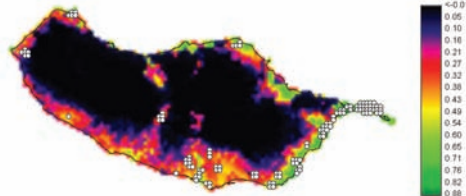
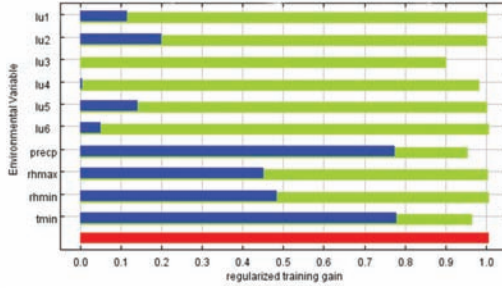
Figura 9. Distribuição potencial de *Convolvulus massonii* (a) e *Chamaemeles coriacea* (b) na ilha da Madeira (mapas). Os gráficos apresentam os resultados da avaliação de *jackknife* acerca da importância relativa dos preditores (modelos sem variável a verde, com apenas a variável a azul e com todas as variáveis a vermelho).

Figure 9. The maps show the potential distribution of *Convolvulus massonii* (a) and *Chamaemeles coriacea* (b) on Madeira Island. The graphs display the results of the jackknife evaluation of relative importance of predictors (green, without variable; blue, with only the variable; red, with all variables).

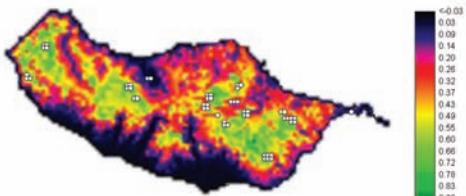
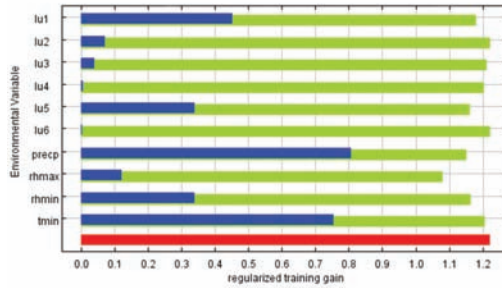




(a)



(b)



(c)

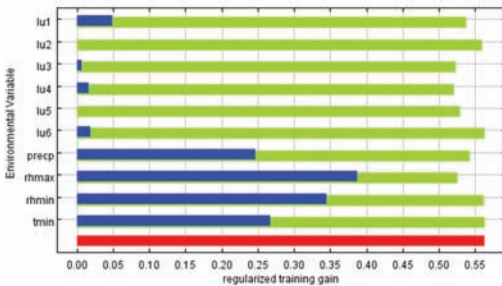


Figura 10. Distribuição potencial de *Craspedopoma mucronatum* (a), *Leptaxis groviana groviana* (b) e *Plutonia marcida* (c) na ilha da Madeira (mapas). Os gráficos apresentam os resultados da avaliação de *jackknife* acerca da importância relativa dos preditores (modelos sem variável a verde, com apenas a variável a azul e com todas as variáveis a vermelho).

Figure 10. The maps show the potential distribution of *Craspedopoma mucronatum* (a), *Leptaxis groviana groviana* (b) and *Plutonia marcida* (c) on Madeira Island. The graphs display the results of the jackknife evaluation of relative importance of predictors (green, without variable; blue, with only the variable; red, with all variables).

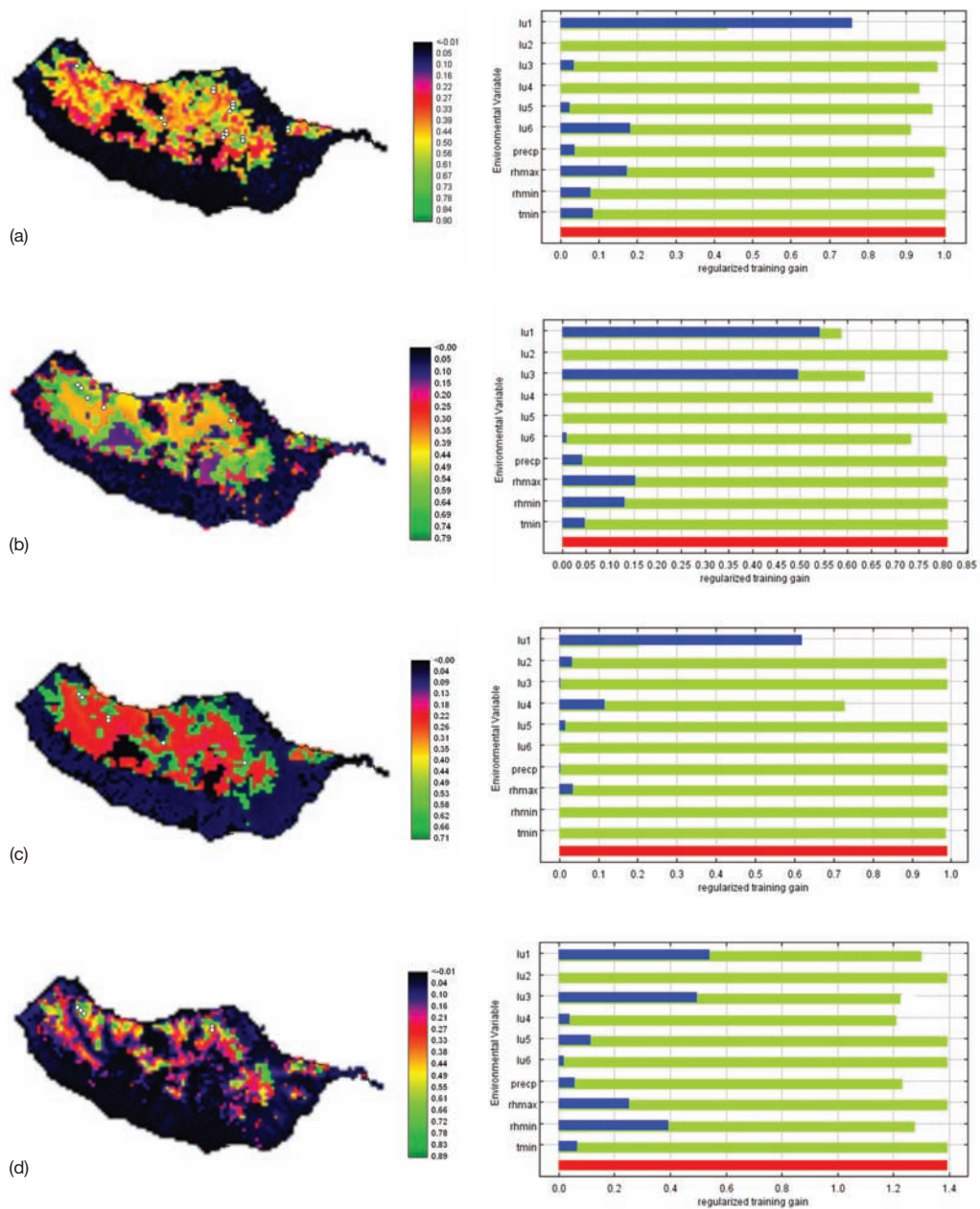


Figura 11. Distribuição potencial de *Orthomus curtus* (a), *Orthomus dilaticollis* (b), *Orthomus gracilipes* (c) e *Orthomus susanae* (d) na ilha da Madeira (mapas). Os gráficos apresentam os resultados da avaliação de *jackknife* acerca da importância relativa dos preditores (modelos sem variável a verde, com apenas a variável a azul e com todas as variáveis a vermelho).

Figure 11. The maps show the potential distribution of *Orthomus curtus* (a), *Orthomus dilaticollis* (b), *Orthomus gracilipes* (c) and *Orthomus susanae* (d) on Madeira island. The graphs display the results of the jackknife evaluation of relative importance of predictors (green, without variable; blue, with only the variable; red, with all variables).

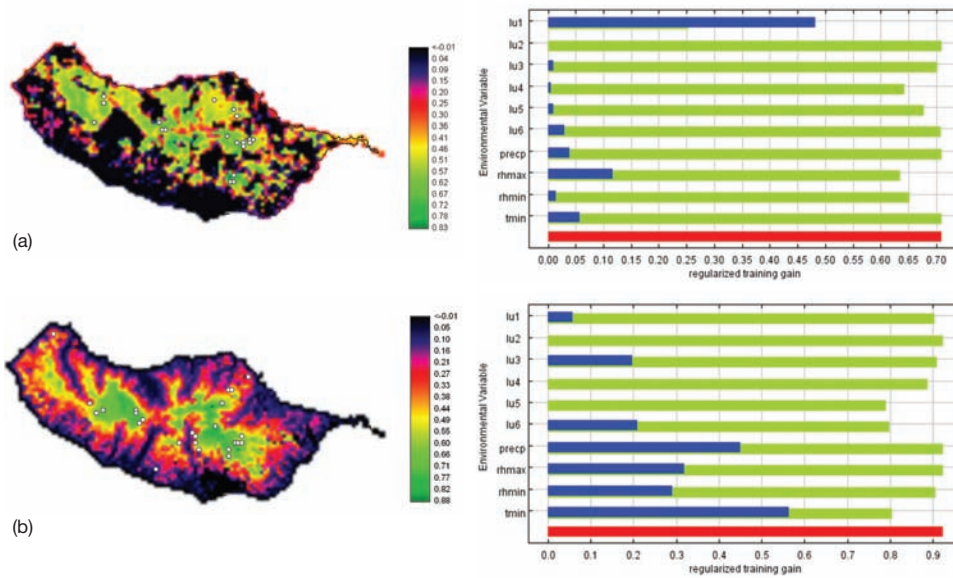


Figura 12. Distribuição potencial de *Gonepteryx maderensis* (a) e *Hipparchia maderensis* (b) na ilha da Madeira (mapas). Os gráficos apresentam os resultados da avaliação de *jackknife* acerca da importância relativa dos preditores (modelos sem variável a verde, com apenas uma variável a azul e com todas as variáveis a vermelho).

Figure 12. The maps show the potential distribution of *Gonepteryx maderensis* (a) and *Hipparchia maderensis* (b) on Madeira Island. The graphs display the results of the jackknife evaluation of relative importance of predictors (green, without variable; blue, with only the variable; red, with all variables).

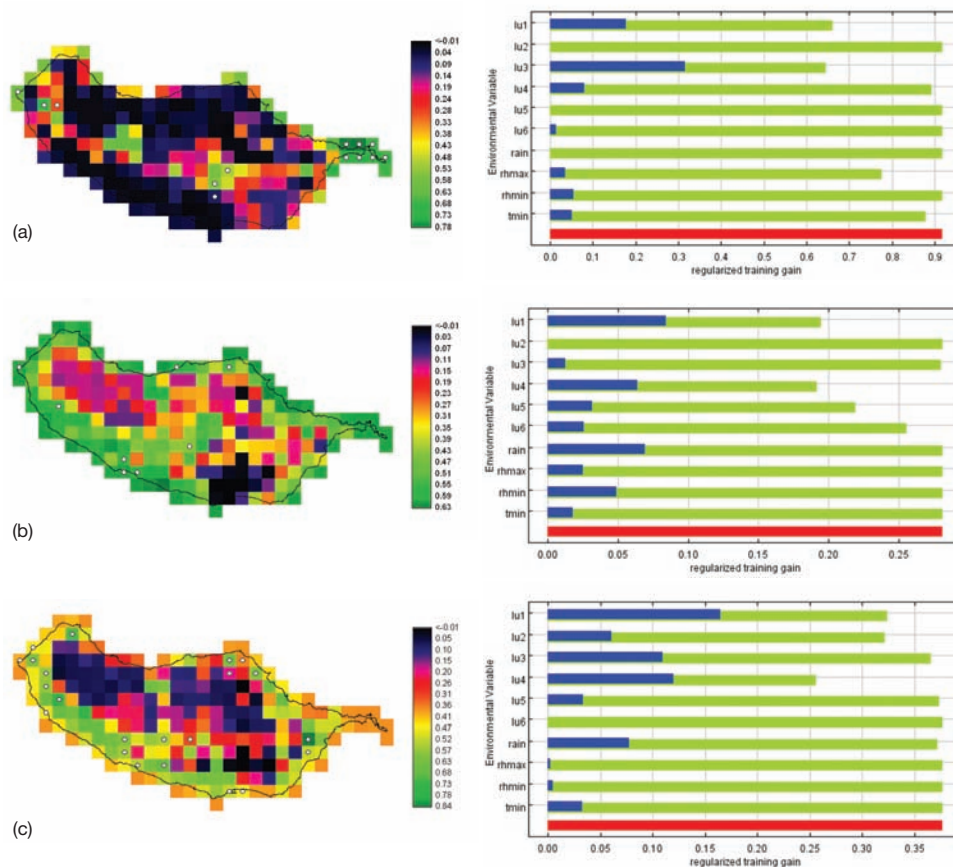


Figura 13. Distribuição potencial de *Anthus berthelotii madeirensis* (a), *Carduelis cannabina guentheri* (b) e *Carduelis chloris* (c) na ilha da Madeira (mapas). Os gráficos apresentam os resultados da avaliação de *jackknife* acerca da importância relativa dos preditores (modelos sem variável a verde, com apenas a variável a azul e com todas as variáveis a vermelho).

Figure 13. The maps show the potential distribution of *Anthus berthelotii madeirensis* (a), *Carduelis cannabina guentheri* (b) and *Carduelis chloris* (c) on Madeira Island. The graphs display the results of the jackknife evaluation of relative importance of predictors (green, without variable; blue, with only the variable; red, with all variables).



---

mico com grande diversidade em regiões altas da América do Sul.

- ***Porella inaequalis*** (Gottsche ex Steph.) Perss. (Porellaceae) (Fig. 2c) é uma espécie foliosa endêmica rara. Ocorre maioritariamente na encosta Norte das florestas de Laurissilva na ilha da Madeira, a cerca de 900 m de altitude acima do nível do mar, onde a precipitação é superior a 3000 mm/ano e a humidade ao longo de todo o ano é elevada (75-90%). A espécie cresce em vales profundos, nas encostas sombreadas ao longo de pequenos cursos de água, formando tapetes descontínuos. É também encontrada com menos frequência na casca de árvores endémicas. Como a espécie apenas ocorre em áreas bem preservadas de floresta Laurissilva, a maior parte das plantas que ocorrem na proximidade são endemismos de grande interesse, tal como o feto arbóreo *Culcita macrocarpa* e os arbustos endémicos *Musschia wollastonii* e *Isoplexis sceptrum*. Também é frequente encontrar a espécie *P. inaequalis* associada a outros briófitos endémicos, nomeadamente os musgos *Echinodium setigerum* e *E. spinosum*, e a hepática *Tylimanthus maderensis*. Também já foi encontrada associada às espécies de briófitos *Saccogyna viticulosa*, *Plagiochila exigua* e *Porella canariensis*. A distribuição da espécie está restrita à ilha da Madeira.

#### Plantas vasculares

As duas espécies de plantas vasculares consideradas neste estudo foram seleccionadas tendo em conta o seu estatuto de colonização e de protecção, ambas endémicas e incluídas na Directiva Habitats como prioritárias. Os dados de distribuição das espécies foram obtidos pelo Jardim Botânico da Madeira, através do projecto Life 99 Nat/P/6431 intitulado: “Conservação de espécies vegetais prioritárias e raras da Madeira”.

- ***Chamaemeles coriacea*** Lindl. (Rosaceae). O Buxo-da-rocha (Fig. 3a) é um arbusto ramificado, perenifólio, com folhas obovadas e coriáceas, que pode atingir a altura de 4 m. Esta espécie é típica do Zambujal (*Mayteno umbellatae-Oleetum maderensis*), um tipo de floresta indígena da Madeira, dominada pela Oliveira-brava (*Olea maderensis*), presente do nível do mar até aos 200 m de altitude na encosta Sul da ilha. A espécie *C. coriacea* ocorre em falésias costeiras e em ravinhas no interior das ilhas da Madeira, Porto Santo e Desertas.
- ***Convolvulus massonii*** F.Dietr. (Convolvulaceae). A Corriola (Fig. 3b) é uma espécie arbustiva, perenifólia, trepadeira, ramificada, que pode atingir 4 m de altura. Esta liana é típica da Laurissilva do Barbusano (*Semele androgynae-Apollonietum barbujanae*), floresta mediterrânica dominada pelo Loureiro (*Laurus novocanariensis*) e pelo Barbusano (*Apollonias barbujana*), com distribuição potencial entre os 300 e os 800 m de altitude na costa Sul e na costa Norte entre os 50 e 450 m de altitude. Esta espécie também ocorre em áreas de Zambujal.

ra Island at 900 m.a.s.l., where the rainfall is greater than 3,000 mm per year and the humidity level is high during the entire year (75-90%). The species grows in deep valleys, on the shaded slopes located along-side rivulets, forming scattered mats. In rare instances, it can be found on the bark of endemic trees. As it only exists in well-preserved areas of Laurissilva, most of the plants growing in the vicinity are endemics such as the rare tree fern *Culcita macrocarpa* and the endemic bushes *Musschia wollastonii* and *Isoplexis sceptrum*. *Porella inaequalis*, is also frequently found in the presence of other endemic bryophytes such as the mosses *Echinodium setigerum* and *E. spinosum* and the liverwort *Tylimanthus maderensis*. It has also been found associated with *Saccogyna viticulosa*, *Plagiochila exigua* and *Porella canariensis*. The species' distribution is restricted to Madeira Island.

#### Vascular plants

Two vascular plant species were selected based on their degree of endemism and protection status, both species are endemic and included in the European Habitats Directive. Distribution data was collected by the Botanical Garden of Madeira Island, funded by the grant Life 99 Nat/P/6431 – “Conservation of rare and priority plant species from Madeira Island”.

- ***Chamaemeles coriacea*** Lindl. (Rosaceae). Common name – Buxo-da-rocha. (Fig. 3a). This branched evergreen shrub that grows up to 4 m tall, with spoon-shaped, coriaceous leaves. This species is typical of the indigenous forest of Madeira Island, the “zambujal” (*Mayteno umbellatae-Oleetum maderensis*), which is dominated by wild olive (*Olea maderensis*), and found between 0 and 200 m on the southern coast. This species inhabits coastal rocky cliffs and inland ravines on Madeira, Porto Santo and Desertas islands.
- ***Convolvulus massonii*** F.Dietr. (Convolvulaceae). Common name – Madeira Morning Glory, *Corriola* (Fig. 3b). This is a perennial climbing shrub with branched stems that can grow more than 4 m long. This liana is typical of the *Barbusano Laurissilva* (*Semele androgynae-Apollonietum barbujanae*), a Mediterranean Laurissilva dominated by the Canary Laurel (*Apollonias barbujana*) and the Laurel tree (*Laurus novocanariensis*). Its potential distribution ranges between 300 and 800 m altitude on the southern coast and between 50 and 450 m altitude on the northern coast. This Convolvulaceae species is also found in *zambujal* areas.

A selecção das espécies de moluscos terrestres para este estudo teve em conta o tipo de colonização (todas endémicas), a distribuição, a morfologia (tamanho da espécie, presença/ausência de concha e forma da concha) e a exactidão dos dados de distribuição das espécies. O principal objectivo foi seleccionar um grupo de espécies distintas entre si no que diz respeito aos habitats ocupados e às características morfológicas, que poderão reflectir diferentes requisitos nas condições ambientais das espécies. Foram então seleccionadas três espécies endémicas da ilha da Madeira: *Craspedopoma mucronatum* (Menke, 1830), *Leptaxis groviana groviana* (Férussac, 1832) e *Plutonia marcida* (Gould, 1847).

- ***Craspedopoma mucronatum*** (Menke, 1830) (Cyclophoridae) (Fig. 4a) está comumente associada a habitats de floresta, mas pode também ocorrer nas zonas costeiras a norte e a sul da ilha da Madeira. A concha é cuneiforme (em forma de cunha), podendo atingir até 7 mm de diâmetro.
- ***Leptaxis groviana groviana*** (Férussac, 1832) (Hygromiidae) (Fig. 4b) ocorre frequentemente na costa Sul da ilha, desde o nível do mar até aos 400 m de altitude. Está associada a terrenos agrícolas e outras áreas com intervenção humana. Tem uma concha com uma forma discóide e achatada, com um diâmetro de aproximadamente 22 mm.
- ***Plutonia marcida*** (Gould, 1847) (Vitrinidae) (Fig. 4c) é típico de áreas húmidas na floresta Laurissilva. A concha, brilhante e transparente, tem uma forma discóide e achatada, com um diâmetro de 5 a 7 mm.

#### Carabídeos (Insecta, Coleoptera)

A ilha da Madeira apresenta uma fauna de carabídeos rica, com um grande número de espécies endémicas (Machado 1995; Serrano & Boieiro 2008). Este grupo de escaravelhos é frequentemente escolhido para estudos de ecologia e conservação, uma vez que reúne muitos dos atributos que caracterizam um grupo indicador eficaz (Rainio & Niemela 2003; Pearce & Venier 2006).

Os carabídeos da Madeira são um grupo de escaravelhos da sub-ordem Adephaga, acerca do qual se tem um bom nível de conhecimento faunístico. Este facto permite-nos a interpretação e a discussão dos resultados obtidos através da modelação da distribuição de espécies do grupo. Para este estudo, seleccionámos quatro espécies endémicas do género *Orthomus*, todas elas associadas à floresta Laurissilva, mas variando nos seus requisitos ecológicos. Duas das espécies, *O. curtus* e *O. gracilipes*, têm uma ampla distribuição na Laurissilva, enquanto a espécie *O. dilaticollis* é estenotópica e ocorre em áreas de maior altitude. *O. dilaticollis* também ocorre em áreas onde outras espécies do género estão presentes. A nova espécie *O. susanae* n.sp. foi descoberta recentemente e está neste momento a ser descrita por dois dos autores deste estudo (Serrano *et al.* subm.). Com a selecção destas espécies pretende-se entender os factores ambientais que limitam a distribuição das espé-

The selection of terrestrial molluscs was based on their endemism, distribution, morphology (size of the specimen, presence/absence of a shell and its shape) and accuracy of the distribution data. The main objective was to select a group of species distinctive in relation to their habitats and morphological characteristics, which may influence the environmental conditions that they can handle. Three species, all of them endemic to Madeira Island, were thus selected: *Craspedopoma mucronatum* (Menke, 1830), *Leptaxis groviana groviana* (Férussac, 1832) and *Plutonia marcida* (Gould, 1847).

- ***Craspedopoma mucronatum*** (Menke, 1830) (Cyclophoridae) (Fig. 4a) is commonly associated with forest habitats, but may also occur in the northern and southern coastal areas of Madeira Island. The shell of this species is cuneiform (wedge-shaped) with up to 7 mm in diameter.
- ***Leptaxis groviana groviana*** (Férussac, 1832) (Hygromiidae) (Fig. 4b) usually occurs on the south coast of the island between sea level up to 400 m.a.s.l., associated with agricultural lands or other human managed areas. It has a discoid and depressed shell with a diameter of approximately 22 mm.
- ***Plutonia marcida*** (Gould, 1847) (Vitrinidae) (Fig. 4c) is typical of humid areas in the Laurissilva forest. The shell has a discoid and depressed shape, a diameter of 5 to 7 mm and is shiny and transparent.

#### Ground beetles (Insecta, Coleoptera)

The ground beetle Fauna of Madeira is relatively rich and presents a high number of endemic species (Machado 1995; Serrano & Boieiro 2008). This group of beetles is frequently selected for ecological and conservation studies since it fulfils many of the criteria of effective indicator taxa (Rainio & Niemela 2003; Pearce & Venier 2006).

Madeiran ground beetles are a group of adepagan Coleoptera about which we have a good amount of faunistic knowledge. This solid faunistic knowledge allows us to interpret and comment on the results achieved by modelling the distribution of a particular species. We have selected four endemic *Orthomus* species as study organisms, all of them highly associated with Laurissilva, but differing somewhat on their ecological requisites. Two of the species (*O. curtus* and *O. gracilipes*) are relatively widespread in the Laurissilva forests while *O. dilaticollis* is more stenotopic, being located at a higher altitude, but also co-occurring with other congeners in some localities. *Orthomus susanae* n. sp., was recently discovered and has been formally described by two of the authors (Serrano *et al.* subm.). By selecting these species we intend to explore the environmental factors that constrain their distribution, shedding some light on the factors affecting their distribution pattern. Additionally, by modelling the distribution of

cies e elucidar acerca das razões que explicam o padrão de distribuição. Por outro lado, a modelação da distribuição de espécies descobertas recentemente permite direccionar esforços de amostragem e de investigação para áreas onde a ocorrência desta espécie é altamente provável, e, assim, melhorar a informação acerca da sua biologia e do seu estatuto de conservação. Apesar das limitações das técnicas existentes, acreditamos que os resultados obtidos através da modelação preditiva de distribuição poderão ser de grande utilidade para o nosso trabalho de investigação.

Os dados de distribuição de espécies utilizados nesta modelação foram reunidos durante o ano de 2006 (de 22 de Maio a 9 de Junho) como resultado da implementação de um projecto acerca da biodiversidade de artrópodes terrestres da ilha da Madeira, financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (PDCT/BIA-BDE/59202/2004). Foram amostrados 26 locais na Laurissilva, utilizando 30 armadilhas de *pitfall* por local (mantidas no campo durante 15 dias). A ocorrência das espécies de *Orthomus* foi registada com base em sistemas de geo-referenciação e os dados posteriormente usados para o processo de interpolação. Evitámos o uso de dados históricos de distribuição de espécies, uma vez que os habitats naturais da ilha da Madeira sofreram mudanças drásticas nas últimas décadas, levando provavelmente à extinção de muitas das populações de insectos associadas a esses habitats.

- ***Orthomus curtus*** (Wollaston, 1854) (Carabidae) (Fig. 5a) é uma espécie estritamente associada ao solo da Laurissilva e que pode ser encontrada debaixo de pedras ou na manta morta. Tal como as outras espécies do mesmo género, é uma espécie predadora polífaga, que se alimenta de uma grande variedade de micro-artrópodes. Ocorre em quase todos os fragmentos de Laurissilva e, quando em simpatria, é geralmente mais abundante do que as suas congéneres.
- ***Orthomus dilaticollis*** (Wollaston, 1854) (Carabidae) (Fig. 5b) parece ter uma distribuição mais restringida do que *O. curtus* e *O. gracilipes*, e pode ser encontrada em zonas mais altas do que as suas congéneres. Ocorre predominantemente na parte ocidental da ilha e foi encontrada, em alguns locais, em simpatria com *O. curtus*, *O. gracilipes* ou *O. susanae*. Não há registos da presença desta espécie nos fragmentos orientais de Laurissilva na ilha da Madeira.
- ***Orthomus gracilipes*** (Wollaston, 1854) (Carabidae) (Fig. 5c) está também associada à Laurissilva, onde parece ter uma ampla distribuição, apesar da sua ausência nos fragmentos mais orientais. Em alguns locais, *Orthomus gracilipes* ocorre juntamente com *O. dilaticollis* e/ou *O. curtus*, apresentando geralmente uma abundância menor do que *O. curtus*.
- ***Orthomus susanae*** Serrano & Borges, n. sp. (Carabidae) (Fig. 5d) parece ser uma espécie mais críptica do que as suas congéneres e é actualmente conhecida no Fanal, onde ocorre com grande abundância, e Ribeiro Bonito, onde parece ser rara. No Fanal, co-ocorre com *O. curtus*, a baixa altitude, e com *O. dilaticollis*, a maior altitude.

a recently discovered species it is possible to focus research efforts on specific areas where the occurrence of this species is highly probable, allowing us to improve our data on its biology and conservation status. Despite the limitations of these techniques, we believe that our research will benefit from the results obtained by predictive distribution modelling.

The data used in the simulation was gathered during 2006 (between May 22nd and June 9th) as part of a research project on the biodiversity of Madeiran terrestrial arthropods financed by the Fundação para a Ciência e a Tecnologia (PDCT/BIA-BDE/59202/2004). Twenty-six sites were sampled by means of pitfall trapping within the area of Laurissilva (30 traps/site, with traps active for 15 days). The localities where the selected *Orthomus* species occurred were recorded by means of geopositioning systems and then used for the interpolation process. We avoided the use of historical data because some of the Madeiran natural habitats suffered drastic changes in the last decades, probably leading to the extinction of many of the associated insect populations.

- ***Orthomus curtus*** (Wollaston, 1854) (Carabidae) (Fig. 5a) is a species strictly associated with the underground of the Laurissilva where it can be found beneath stones or in the forest litter. Like the other species of this genus, it is a polyphagous predator feeding on a diversity of micro-arthropods. It occurs in most of the fragments of Laurissilva and, when in sympatry, it is generally more abundant than its congeners.
- ***Orthomus dilaticollis*** (Wollaston, 1854) (Carabidae) (Fig. 5b) seems more localized than both *O. curtus* and *O. gracilipes*, and can be found at higher altitudes than its congeners. It occurs predominantly in the western part of the island and in some sites was found in sympatry with *O. curtus*, *O. gracilipes* or *O. susanae*. There are no records of this species from the most eastern fragments of Laurissilva.
- ***Orthomus gracilipes*** (Wollaston, 1854) (Carabidae) (Fig. 5c) is also associated with Laurissilva, where it appears to be relatively widespread, despite its absence from the most eastern forest fragments. In some locations, *Orthomus gracilipes* co-occurs with both *O. dilaticollis* and/or *O. curtus*, usually presenting lower abundance than its latter congener.
- ***Orthomus susanae*** Serrano & Borges n. sp. (Carabidae) (Fig. 5d) appears to be more cryptic than its congeners and is presently known to exist in Fanal, where it is very abundant, and Ribeiro Bonito, where it seems rare. In Fanal, the species co-occurs with *O. curtus* at lower altitudes and with *O. dilaticollis* at higher altitudes.



---

## Borboletas (Insecta, Lepidoptera)

Existem três espécies e duas subespécies endêmicas de borboletas na ilha da Madeira. As duas espécies endêmicas seleccionadas para este estudo, ambas desempenhando um papel muito importante nos ecossistemas, apresentam diferenças significativas nas abundâncias e nos habitats preferenciais onde ocorrem (Wakeham-Dawson *et al.* 2002).

- ***Gonepteryx maderensis*** Felder, 1862 (Pieridae) (Fig. 6a). Segundo dados publicados e registos dos autores deste estudo, esta espécie está associada à copa da floresta húmida de Laurissilva. Existem poucos registos da presença desta espécie fora da área de distribuição da Laurissilva e os indivíduos pontuais encontrados noutros habitats devem ter sido provavelmente levados por ventos fortes. É frequente observar adultos desta espécie a voar de Fevereiro a Setembro, entre os 300 e os 1700 m de altitude. Não é uma espécie rara, mas pode-se dizer que é tão pouco frequente como a única espécie de planta da qual se alimenta, o sanguinho da Macaronésia.
- ***Hipparchia maderensis*** (Bethune-Baker, 1891) (Nymphalidae) (Fig. 6b). Os registos disponíveis sobre esta espécie indicam que ocorre em qualquer altitude, mas é particularmente comum em áreas acima dos 1000 m. As lagartas alimentam-se de várias espécies de Poaceae. É frequente observar muitos indivíduos adultos no grande planalto da ilha da Madeira, Paúl da Serra, desde o fim da Primavera até ao fim do Verão.

## Aves

A selecção dos *taxa* de aves a considerar para este estudo foi feita com base no tipo de colonização, na sua distribuição, no tipo e área de habitat disponível, na abundância e na exactidão dos dados das espécies. Os dados de distribuição utilizados nos modelos são o resultado de um trabalho de campo muito exaustivo, que se desenvolveu durante a época de nidificação, de Fevereiro a Julho, durante os anos de 1999 a 2002. Foram realizados 90 transectos de 2 horas cada, segundo uma grelha geo-referenciada (UTM) de 2x2 km (para mais detalhes ver Oliveira & Menezes 2004). Espera-se que os modelos preditivos de distribuição ajudem a explicar as razões que levam a uma presença quase exclusiva de subespécies endêmicas raras em áreas com uma forte influência humana (directa ou indirecta), tais como áreas de floresta exótica, áreas agrícolas e habitats naturais perturbados.

- ***Anthus berthelotii*** Bolle, 1862 (Motacillidae) (Fig. 7a), conhecida como Corre-caminhos, é uma espécie endêmica da Macaronésia, que ocorre exclusivamente nos arquipélagos da Madeira e das Canárias e que compreende duas subespécies: *A. b. madeirensis* e *A. b. berthelotii*. *Anthus berthelotii madeirensis* (Erlanger, 1899) está apenas presente na ilha da Madeira, onde apresenta uma distribuição fragmentada, com preferência para terrenos rochosos e de baldio, em áreas abertas, a qualquer altitude.
- ***Carduelis chloris*** Linnaeus, 1758 (Fringillidae) (Fig. 7b)

---

## Butterflies (Insecta, Lepidoptera)

There are three endemic species and two endemic subspecies of butterflies on Madeira Island. The two endemic species selected, both equally important in their ecosystems, show considerable differences in terms of abundance and preferred habitats (Wakeham-Dawson *et al.* 2002).

- ***Gonepteryx maderensis*** Felder, 1862 (Pieridae) (Fig. 6a), known as the Madeiran Brimstone, is intimately associated with the humid Laurissilva forest canopy, as indicated in our own records and other publications. Very few records fall outside the Laurissilva distribution area and these few records are probably isolated specimens driven out of their habitats by strong winds. Adults have been seen flying from February thru September, between 300 and 1,700 m.a.s.l. The Madeiran Brimstone is not a rare species but can be considered scarce since it only has one known food-plant, the Macaronesian Buckthorn.
- ***Hipparchia maderensis*** (Bethune-Baker, 1891) (Nymphalidae) (Fig. 6b) is commonly known as the Madeiran Grayling. The records indicate that it can be found at almost all altitudes, but it is fairly common above 1,000 m.a.s.l. where its preferred habitat is located, and its caterpillars feed on several species of Poaceae. One of the best places to observe this endemic nymphalid butterfly is at the top of the island's only large plateau, Paúl da Serra, where hundreds of individuals can be seen flying from late spring throughout the summer.

## Birds

The selection of bird *taxa* used for this analysis was based on their degree of endemism, patchy distribution, type and area of available habitat, low abundance and quality of data. The data used in the simulations are the result of extensive fieldwork, which took place during the nesting seasons, February to July, from 1999 to 2002. Ninety transects of 2 hours were performed along a georeferenced grid (UTM) of 2x2 km (for further details see Oliveira & Menezes 2004). It is expected that the predictive distribution models will help explain the factors that dictate the almost exclusive presence of uncommon endemic subspecies in areas with a strong direct or indirect human influence (exotic forest, farmland and disturbed natural habitats).

- ***Anthus berthelotii*** Bolle, 1862 (Motacillidae) (Fig. 7a), known as the Berthelot's pipit (Corre-caminhos), is a species endemic to Macaronesia, occurring exclusively on the archipelagos of Madeira and the Canary Islands, and is comprised of two subspecies: *A. b. madeirensis* and *A. b. berthelotii*. *Anthus berthelotii madeirensis* (Erlanger, 1899) can be found only on Madeira Island, where it has a patchy distribution, favouring rocky, open and scrubby terrain at all altitudes.
- ***Carduelis chloris*** Linnaeus, 1758 (Fringillidae) (Fig. 7b), known as the Greenfinch (Verdilhão), is a native species of Madeira Island. It favours areas of exotic forest, mixed forest near farmland and/or open patchy scrub areas. It

---

conhecida como Verdilhão, é uma espécie nativa da ilha da Madeira. Tem preferência por áreas de floresta exótica, floresta mista próxima de áreas agrícolas e/ou áreas de baldio abertas. Pode também ser encontrada em áreas urbanas.

- ***Carduelis cannabina guentheri*** Wolters, 1953 (Fringillidae) (Fig. 7c), conhecida como Pintaroxo, é uma subespécie endêmica das ilhas da Madeira e de Porto Santo. Ocorre preferencialmente em áreas com gramíneas e com alguns arbustos. Também está frequentemente presente em áreas agrícolas e pode ocasionalmente ser encontrada em jardins e em sítios humanizados.

#### 4.2. As variáveis preditoras

Para modelar a distribuição das espécies, utilizámos variáveis climáticas e de uso do solo. Todos os mapas foram redimensionados para a resolução mínima dos dados disponíveis de presença de espécies, ou seja, 500x500 m; excepto para a modelação das aves, para as quais se usou uma resolução de 2x2 km:

- a) os dados climáticos foram obtidos pelo modelo CIELO (Clima Insular à Escala Local), desenvolvido por Azevedo (1996). O CIELO é um modelo de base física que simula as variáveis climáticas numa ilha usando dados de uma única estação meteorológica de referência (ver Azevedo 1996 e Azevedo *et al.* 1999). A estação de referência “conhece” a sua posição no contexto da orografia e do regime da dinâmica atmosférica e controla o modelo a partir desse ponto. Como fronteira é utilizada uma cobertura “raster” proveniente de um modelo digital do terreno (MDT) no âmbito de um Sistema de Informação Geográfica. O modelo é forçado com a climatologia à escala regional. Os processos são simulados de acordo com a orientação e a direcção da circulação das massas de ar. O modelo consiste em dois submodelos, um que simula os processos advectivos (transferência espacial de propriedades físicas do ar em movimento), outro para fins de radiação solar e balanço de energia. A componente de simulação da advecção tem como base o efeito de Föhn para reproduzir os processos termodinâmicos que ocorrem no seio de uma massa de ar quando esta é obrigada a transpor o obstáculo orográfico (ilha). Os processos termodinâmicos são modelados da seguinte forma: inicialmente, uma coluna de ar húmida, com uma determinada temperatura (T1) e humidade relativa (HR1), é forçada a ascender a barlavento das ilhas, percorrendo a mesma segundo a direcção e sentido do vento; no percurso da subida, a temperatura da coluna de ar diminui e o ar satura (são considerados os gradientes adiabáticos seco e saturado), com a conseqüente condensação de vapor de água na coluna; sob condições físicas favoráveis, uma fracção de água na forma líquida precipita; a sotavento da ilha, a massa de ar adquire uma humidade relativa (HR2) inferior a HR1 e uma temperatura (T2) superior a T1. Aos montantes de precipitação modelado pelo CIELO, designados por precipitação orográfica,

can also be seen in urban centres.

- ***Carduelis cannabina guentheri*** Wolters, 1953 (Fringillidae) (Fig. 7c), known as the Linnet (Pintaroxo), is an endemic subspecies of the Madeira and Porto Santo islands. It favours areas dominated by graminæ and with some shrubs. It occurs frequently in agricultural areas, and can occasionally be seen in gardens and humanized places.

#### 4.2. The predictors

We used climatic and land-use variables to model the distribution of species. All maps were resized to the minimum resolution of presence data, i.e., 500x500 m (except for birds, where the resolution used was 2x2 km):

- a) Climate data were obtained from the CIELO Model developed by Azevedo (1996). The model CIELO (acronym for “Clima Insular à Escala Local”) is a physically based model that simulates the climatic variables for an island using data from a single synoptic reference meteorological station (see Azevedo 1996 and Azevedo *et al.* 1999). The reference station “knows” its position in the orographic and dynamic regime context and controls the model on that position. The domain of computation is a GIS raster grid parameterized with a digital elevation model (DEM). The process is adjusted following the direction of the circulation of air masses. The model consists of two main sub-models, one for the advective processes simulation and another for solar radiation and energy balance purposes. The advective component simulation assumes the Föhn effect to reproduce the dynamic and thermodynamic processes occurring when an air mass moves through the island’s orographic obstacle. The processes modelled are as follows: initially a moist air column over the ocean, with temperature T1 and relative humidity RH1, is forced to ascend the upstream side of the island’s topography in the wind direction; during the ascending path, the column’s temperature decreases and the air saturates (both dry and saturated adiabatic lapse rates are assumed), with the consequent condensation of water vapour in the column; in favourable physical conditions, a fraction of the liquid water contents precipitates; on the lee side of the island, the air mass acquires a relative humidity RH2<RH1 and a temperature T2>T1, characteristic of the Föhn effect. The described precipitation process modelled in CIELO is designated by orographic precipitation. The calibration of CIELO requires the adjustment of two parameters ( $\alpha$  and  $\beta$ ) that govern the efficiency of the precipitation processes. The CIELO model has been calibrated and validated for Madeira Island (see Santos *et al.* 2004), and is now available through CLIMAAT and CLIMARCOST projects (Interreg\_IIIB, MAC 2.3/A3 and 05/Mac/2.3/A1; Azevedo 2003, 2006). The variables

são acrescentados os observados na estação de referência, considerados como provenientes de outros processos. A calibração do CIELO requer o ajuste de dois parâmetros ( $\alpha$  e  $\beta$ ) responsáveis pela eficiência e assimetria dos processos de precipitação. O modelo CIELO foi calibrado e validado para a ilha da Madeira (ver Santos *et al.* 2004 e Tomé 2007) e está actualmente disponível através dos projectos CLIMAAT e CLIMARCOST (Interreg\_IIIB, MAC 2.3/A3 e 05/Mac/2.3/A1; Azevedo 2003, 2006). Foram seleccionadas as variáveis de humidade relativa máxima (hrmax), humidade relativa mínima (hrmin), temperatura anual mínima (tmin) e precipitação anual total (precp). Das variáveis disponíveis, foram estas que apresentaram um menor valor de correlação cruzada e as que se acredita serem mais importantes na limitação da distribuição da maior parte das espécies.

b) Os dados de uso do solo foram obtidos de Anónimo (1991). Foram consideradas cinco variáveis: presença de vegetação nativa (lu1), presença de vegetação exótica (lu2), presença de terrenos agrícolas (lu3), presença de vegetação mista (nativa e exótica) (lu4), presença de área social (lu5), e presença de pastagem natural (lu6). Para as aves, em vez de dados de presença de um tipo de solo, foi utilizado o número de pixels de 10×10 m presentes numa grelha de 2×2 km.

#### 4.3. O processo de modelação

Com base na nossa experiência, foram utilizados os parâmetros de base do *Maxent* e factores lineares e quadráticos de forma a evitar sobrestimação. Também se utilizou o *jackknife* para estimar a importância relativa de cada variável na determinação da distribuição potencial de uma espécie. Para isso, cada variável foi excluída isoladamente e foi criado um modelo com as restantes variáveis. Foi depois criado um modelo usando cada variável isolada e outro modelo utilizando todas as variáveis. Não foi possível avaliar a exactidão das predições do modelo, dado o pequeno número de amostras disponíveis para cada espécie.

#### 4.4. Resultados

Briófitos

*Exorotheca pustulosa* (Fig. 8a)

Os resultados dos modelos preditivos de distribuição de *Exorotheca pustulosa* estão de acordo com o conhecimento actual que se tem da biologia da espécie. A análise confirma que a espécie ocorre maioritariamente a baixa altitude e em áreas com influência climática mediterrânica. Segundo Bischler (2004), a espécie cresce em áreas com uma precipitação média anual entre os 600 e os 700 mm, desde o nível do mar até aos 200 m de altitude, em toda a região mediterrânica. E, de facto, o défice de precipitação determina a distribuição actual e predita da espécie na ilha da Madeira, ocorrendo maioritariamente em áreas com clima mediterrânico temperado e em substratos húmidos no Inverno e muito

extracted were maximum relative humidity (RHmax), minimum relative humidity (RHmin), minimum annual temperature (Tmin) and total annual precipitation (Precp). From the available variables, these were the ones showing the lowest inter-correlation values and, based on expert knowledge, thought to be the most important factors limiting the distribution of most species.

b) Land-use data were obtained from Anónimo (1991). Five variables were extracted: presence of native vegetation (lu1), presence of exotic vegetation (lu2), presence of agricultural land (lu3), presence of mixed vegetation (native and exotic) (lu4), presence of social areas (lu5), and presence of natural grasslands (lu6). For birds, instead of presence, the amount of 10×10 m pixels present in each 2×2 km pixel was used.

#### 4.3. The modelling process

We used default *Maxent* parameters and only linear and quadratic factor types in order to avoid over fitting, according to our previous experience. A *jackknife* procedure was run to estimate the relative importance of each variable in determining the potential distribution of the species. Here, each variable was excluded in turn, and a model was created with the remaining variables. Then a model was created using each variable in isolation. Additionally, a model was created using all variables. Because of low sample sizes, no evaluation of the accuracy of model predictions could be performed.

#### 4.4. Results

Bryophytes

*Exorotheca pustulosa* (Fig. 8a)

Predictive model results agree with current knowledge of the biology of this species. The analysis confirms that *Exorotheca pustulosa* mainly occurs at low altitudes and areas of Mediterranean influence. According to Bischler (2004), this species grows in areas with a mean annual rainfall of between 600 and 700 mm and within an altitudinal range of 0-200 m.a.s.l. in the entire Mediterranean region. The precipitation deficit determines the actual and predicted distribution of the species in Madeira, occurring mainly in areas of Mediterranean temperate and thermophilic climates: humid substrate in winter and very dry in summer. The predicted map identifies the areas of known species occurrence



---

secos no Verão. O mapa de distribuição potencial identifica áreas onde a espécie ocorre e algumas outras áreas onde poderia estar presente. As áreas adequadas para a ocorrência da espécie (representadas a verde no mapa) ocorrem maioritariamente no Sul da ilha. No Norte, são raras as áreas com condições favoráveis, estando a espécie confinada a pequenas áreas em falésias expostas. Actualmente, não existem muitos dados de ocorrência da espécie nestas áreas escarpadas, o que pode ser devido à falta de amostragem nestes locais ou devido a pressão urbanística.

#### *Plagiochila stricta* (Fig. 8b)

O género *Plagiochila* é característico da brioflora da Madeira, apresentando um grande número de espécies e uma distribuição muito grande em diferentes habitats. Algum trabalho de campo realizado recentemente revelou que as espécies deste género apresentam uma frequência elevada na floresta Laurissilva, sobretudo em encostas e rochas, mas também na casca de diferentes árvores. O resultado da modelação da distribuição para a espécie *P. stricta*, tendo em conta a bibliografia disponível e outros trabalhos não publicados, identificou várias áreas dentro de fragmentos de Laurissilva onde a presença da espécie é provável. O modelo revela também uma grande probabilidade de ocorrência da espécie em algumas áreas da parte oriental da ilha, tais como Achadas da Cruz e Faial. A adequabilidade prevista para a espécie de áreas na parte sudoeste da Madeira não está, na nossa opinião, correcta, uma vez que a espécie é sensível a parâmetros microambientais que não foram considerados no processo de modelação. Na verdade, na parte sudoeste da ilha, *P. stricta* ocorre apenas em vales abrigados de alguns fragmentos isolados de Laurissilva. A espécie também está ausente em áreas favoráveis mais a Sul, perto do Funchal, provavelmente devido à grande influência antropogénica.

#### *Porella inaequalis* (Fig. 8c)

Os resultados da modelação da distribuição deste *taxa* endémico estão, em geral, de acordo com o conhecimento actual que se tem da espécie. No entanto, o modelo identifica várias áreas de grande adequabilidade para a espécie que não estão de acordo com os resultados dos estudos que se têm vindo a desenvolver. De facto, essas áreas têm sido amostradas por briólogos de forma intensiva durante o último século, sem nunca se ter registado a presença da espécie, conspícua, nesses locais. Contudo, alguns desses locais são de difícil acesso e os esforços de amostragem para localizar a espécie deverão, no futuro, concentrar-se nesses locais.

#### Plantas vasculares

#### *Convolvulus massonii* (Fig. 9a)

A distribuição de *Convolvulus massonii* parece ser influenciada pela temperatura, a humidade relativa e a precipitação. A espécie apresenta uma grande distribuição potencial, tanto no Sul como no Norte da ilha, sobretudo na zona costeira, coincidindo com a distribuição potencial

and also indicates other areas where they could be present. Highly suitable areas (green in the figure) appear mainly at the south of the island, and are scarcer in the north, where the species might be confined to small patches on exposed cliffs. The lack of data from these areas might be due to lack of surveys in the highly exposed cliffs where the species could potentially inhabit according to the predicted map or to urbanization.

#### *Plagiochila stricta* (Fig. 8b)

*Plagiochila* is a characteristic genus of the Madeiran bryoflora that shows a high biodiversity in terms of number of species and the colonization of different habitats. Recent fieldwork revealed the high frequency of *Plagiochila* species in the Laurissilva, mainly on slopes and rocks, but also on the bark of several trees. The result of the distribution model for *P. stricta* identified several areas within the Laurissilva patches where the presence of this species is highly probable. Taking the published data on its distribution and some unpublished data into consideration, the model reveals a high probability of occurrence of this species in areas at the eastern part of the island (Achadas da Cruz and Faial). The species' potential occurrence on the southwestern slope of Madeira, as predicted by the model, is erroneous due to the sensitivity of the *taxon* to several micro-environmental parameters not considered in the modelling process. In such areas, *P. stricta* occurs only in some isolated and protected Laurissilva fragments located in sheltered valleys. Indeed, *P. stricta* is absent from the southernmost suitable areas located near Funchal, probably because of the high anthropogenic influence in the area.

#### *Porella inaequalis* (Fig. 8c)

Model output for this endemic species is, in general, in accordance with current knowledge. However, the model identifies several areas of high suitability for the species that are not in accordance with the results of bryological studies. Bryologists have intensively sampled these areas during the last century, without revealing the presence of this conspicuous species. However, some localities in those areas present a rather inaccessible topography which complicates the surveys. Future efforts to locate this endemic species should concentrate there.

#### Vascular Plants

#### *Convolvulus massonii* (Fig. 9a)

The distribution of *Convolvulus massonii* seems to be influenced by temperature, relative humidity and precipitation. It shows a vast potential distribution, both on the southern and northern parts of the island, particularly on the coast, which overlaps the potential distribution of its

do seu habitat preferencial, a Laurissilva do Barbusano. A maior parte da sua distribuição potencial na parte Sul da ilha está sob grande influência humana, o que restringe a espécie a pequenas áreas dispersas de Laurissilva do Barbusano, sobretudo em escarpas isoladas. É por isso que a maior parte das populações de *Convolvulus massonii* são encontradas no Norte da Madeira.

#### *Chamaemeles coriacea* (Fig. 9b)

Tendo em conta os resultados do modelo, a distribuição de *Chamaemeles coriacea* parece ser influenciada directamente pela precipitação, humidade relativa e temperatura. Deste modo, a sua distribuição potencial cobre maioritariamente áreas de baixa altitude no Sul da Madeira, onde a precipitação e a humidade relativa são mais baixas e as temperaturas mínimas são mais altas do que no Centro e no Norte da ilha. No entanto, a maior parte da área de distribuição predita no Sul sofre grande pressão humana, o que restringe a distribuição da espécie a escarpas inacessíveis.

#### Moluscos

##### *Craspedopoma mucronatum* (Fig. 10a)

Os resultados do modelo preditivo sugerem que a ocorrência de *C. mucronatum* pode ser influenciada directamente por variáveis climáticas, em particular a precipitação e a temperatura mínima. Apesar da espécie ser frequente em habitats de floresta, parece estar bem adaptada a áreas mais secas e quentes da ilha, com uma cobertura de vegetação diferente. O modelo de distribuição prediz também que as zonas costeiras de toda a ilha, desde o nível do mar até aos 300 m de altitude, podem ter condições ambientais favoráveis para a ocorrência da espécie.

##### *Leptaxis groviana groviana* (Fig. 10b)

A distribuição de *L. groviana groviana* parece ser influenciada por factores climáticos, em particular a precipitação e a temperatura mínima. O modelo de distribuição prevê a ocorrência da espécie em áreas com vegetação nativa e áreas urbanas. É esperada a ocorrência de *L. groviana groviana* em áreas urbanas, uma vez que a espécie está actualmente bem adaptada a este tipo de habitats alterados pelo Homem.

##### *Plutonia marcida* (Fig. 10c)

A distribuição de *P. marcida* parece ser influenciada exclusivamente pelas quatro variáveis climáticas analisadas, em particular, pela humidade relativa máxima e mínima. Estes resultados devem-se à fisiologia típica da família Vitrinidae, que apresenta uma grande restrição nos níveis de humidade suportáveis. De acordo com o modelo de distribuição, *P. marcida* pode ocupar uma grande parte das áreas altas da ilha. Ao contrário do que seria esperado, a variável da vegetação nativa não parece ter um efeito na distribuição da espécie, o que indica que são necessários mais estudos para validar os resultados obtidos pelo modelo preditivo.

main habitat, the *barbusano laurisilva*. Most of its potential distribution area on the southern part of the island is under strong human influence, which limits the presence of this species to small, dispersed spots of *barbusano laurisilva* on remote cliffs. Consequently, most of the *Convolvulus massonii* populations are found on the northern part of Madeira.

#### *Chamaemeles coriacea* (Fig. 9b)

According to model results, the distribution of *Chamaemeles coriacea* seems to be directly influenced by precipitation, relative humidity and temperature. Therefore, its potential distribution covers mainly low altitude areas of the southern part of Madeira, where rainfall and relative humidity are lower and the minimum temperatures are higher than those of the northern and central parts of the island. However, most of the potential distribution of this species on the southern part of the island is under strong human pressure, thereby limiting its presence to inaccessible cliffs.

#### Molluscs

##### *Craspedopoma mucronatum* (Fig. 10a)

The results of the predictive model suggest that *C. mucronatum* may be directly influenced by climatic variables, particularly by precipitation and minimum temperature. Although commonly present in forest habitats, the species seems to be well adapted to drier and warmer areas of the island where there is distinct vegetation cover. The model also predicts that the species might find adequate environmental conditions on the coast between sea level and up to 300 m around the entire island.

##### *Leptaxis groviana groviana* (Fig. 10b)

The distribution of *L. groviana groviana* seems to be mostly influenced by climatic factors, particularly precipitation and minimum temperature. The distribution model predicts the occurrence of this species in areas of native vegetation and urban habitats. The occurrence of *L. groviana groviana* in urban areas is to be expected since the species is currently well adapted to this type of human-made habitats.

##### *Plutonia marcida* (Fig. 10c)

The distribution of *P. marcida* seems to be exclusively influenced by the four climatic variables analysed, and, in particular, by maximum and minimum relative humidity. This is a result of the physiology of the species, which presents high restrictions to the humidity level, typical of the Vitrinidae family. According to the distribution model, it is expected that *P. marcida* will occupy higher altitudes on the island. Contrary to what was expected, the native vegetation variable does not have an important effect on the distribution of this species. This may indicate that further studies are needed to validate the results obtained with the predictive model.

Os resultados dos modelos preditivos evidenciam algumas diferenças nos padrões de distribuição das diferentes espécies de *Orthomus* seleccionadas. Tendo em conta dados de distribuição da espécie em trabalhos publicados e também registos não publicados da colecção entomológica de um dos autores deste estudo, é apresentada abaixo uma breve análise dos resultados de modelação para cada taxa.

#### *Orthomus curtus* (Fig. 11a)

O modelo preditivo de distribuição para *O. curtus* identificou várias áreas isoladas dentro do habitat de Laurissilva onde a presença desta espécie é altamente provável. Este resultado está de acordo com dados publicados de distribuição da espécie para algumas áreas, como Chão da Ribeira, Rabaçal, Serra de Água e Achada do Teixeira. A elevada probabilidade de ocorrência da espécie em algumas áreas na parte ocidental da ilha, tais como Achada da Cruz e Santa Madalena, precisa de ser validada com trabalho de campo, já que até à data não foram desenvolvidos (que sejam do nosso conhecimento) estudos sistemáticos nestas áreas. Apesar de os modelos de distribuição apontarem como muito favoráveis para a ocorrência de *O. curtus* as áreas a Sul da ilha (perto do Funchal), e apesar de serem sítios frequentemente explorados, acreditamos que essas áreas ao sofrerem uma grande perturbação humana se tenham tornado inabitáveis para a espécie.

#### *Orthomus dilaticollis* (Fig. 11b)

A modelação da distribuição de *O. dilaticollis* identificou um grande número de quadrados contíguos onde a presença da espécie é altamente provável. Este resultado não está de acordo com o que os especialistas previam, uma vez que a espécie parece ser mais estenotópica do que as suas congéneres. A espécie é conhecida de algumas áreas localizadas maioritariamente na parte ocidental da ilha (Rabaçal, Caramujo, Risco, Chão da Ribeira), que foram identificadas claramente nos resultados de modelação. No entanto, a presença desta espécie em algumas áreas identificadas como sendo de ocorrência altamente provável (Ribeiro Frio, Cedro Gordo, Santo da Serra, Terreiro da Luta, Funduras) é duvidosa. De facto, muitas dessas áreas foram exaustivamente amostradas por entomólogos nas últimas duas décadas, sem revelar a presença da espécie conspícua.

#### *Orthomus gracilipes* (Fig. 11c)

Os resultados da modelação preditiva da distribuição de *O. gracilipes* mostraram uma grande probabilidade de ocorrência da espécie em fragmentos isolados de Laurissilva, alguns até de grandes dimensões. Alguns dos locais onde se tem registado a presença de *O. gracilipes* (e.g. Fonte da Pedra, Rabaçal, Fajã da Nogueira, Curral das Freiras, Queimadas, Terreiro da Luta) foram identificados nos modelos. Noutras áreas consideradas pelo modelo como sendo de grande probabilidade de ocorrência (Serra de Água, Por-

The distribution models show some differences in the distribution patterns of the selected *Orthomus* species. A brief analysis of the modelling results is presented below, taking into consideration the published data on the distribution of these species and the unpublished records from one of the authors' entomological collection.

#### *Orthomus curtus* (Fig. 11a)

The predictive distribution model for *O. curtus* identified various isolated areas within the Laurissilva where the presence of this species is highly probable. In fact, this proved to be true for some areas (Chão da Ribeira, Rabaçal, Serra de Água, Achada do Teixeira) after comparing the model results with published data on species distribution. The high probability of occurrence of this species in some areas at the western part of the island (Achada da Cruz, Santa Madalena) needs to be confirmed with fieldwork since no systematic study has been carried out there. In spite of the high suitability spotted by model results, it seems that *O. curtus* is absent from the southernmost areas near Funchal since there is a high human disturbance in these localities, and they have been frequently studied without revealing the presence of this beetle species.

#### *Orthomus dilaticollis* (Fig. 11b)

The distribution modelling for *O. dilaticollis* identified a large number of contiguous squares where the presence of this species is highly probable. This result does not agree with our expert-based predictions since this species appears to be more stenotopic than its congeners. *O. dilaticollis* is known from a few number of localities most of which are located on the western part of the island (Rabaçal, Caramujo, Risco, Chão da Ribeira), and had been clearly identified in the model results. However, the presence of this species in some of the areas identified as having a high probability of occurrence (Ribeiro Frio, Cedro Gordo, Santo da Serra, Terreiro da Luta, Funduras) is certainly elusive. Entomologists have intensively sampled many of these areas during the two last decades without revealing the presence of this conspicuous species.

#### *Orthomus gracilipes* (Fig. 11c)

The results of predictive distribution modelling for *O. gracilipes* showed a high probability of species occurrence in some isolated Laurissilva fragments, several of which of considerable size. Some of the sites where *O. gracilipes* is known to occur have been clearly identified in the model results (e.g., Fonte da Pedra, Rabaçal, Fajã da Nogueira, Curral das Freiras, Queimadas, Terreiro da Luta). In other areas identified as having a high probability of occurrence (Serra de Água, Portela, Santo da Serra and



---

tela, Santo da Serra e Funduras) não foi ainda registada a presença da espécie; e nas áreas mais orientais, a sua presença é pouco provável.

#### *Orthomus susanae* (Fig. 11d)

De acordo com os resultados do modelo preditivo, *O. susanae* apresenta algumas populações pontuais na Madeira, a maior parte no Norte da ilha. O modelo também identificou a área que circunda Achada do Cedro Gordo como uma das zonas com maior probabilidade de ocorrência da espécie, o que sugere que, de futuro, os trabalhos de prospecção se deverão concentrar mais nessa área.

Em geral, os resultados da modelação identificaram claramente muitas das áreas de ocorrência actual das espécies e indicam outros locais onde as espécies de *Orthomus* poderão ser provavelmente encontradas. Em alguns casos, no entanto, os modelos não são congruentes com o presente conhecimento que temos acerca da biologia das espécies. Por exemplo, os resultados obtidos com *O. dilaticollis* (Fig. 11b), uma espécie estenotópica, não eram expectáveis, sobretudo quando comparados com os resultados obtidos com a sua congénere, amplamente distribuída, *O. curtus* (Fig. 11a). A falta de exactidão nos resultados para áreas específicas da floresta de Laurissilva reflectem seguramente o facto de não se terem considerado como predictoras algumas variáveis microambientais. De facto, variáveis como o pH do solo, a humidade do solo ou a densidade da manta morta são determinantes na distribuição de escaravelhos e nem sempre estão correlacionadas com as variáveis climáticas a grande escala. Por outro lado, quando não se considera o papel dos factores históricos/biogeográficos na predição da distribuição de *Orthomus* spp., o modelo também indica várias áreas isoladas como de grande probabilidade de ocorrência da espécie. Estas áreas são o equivalente ao que se designa por ilhas ecológicas, e, apesar de apresentarem condições ambientais semelhantes às de outros locais onde as espécies de *Orthomus* efectivamente ocorrem, a sua colonização foi provavelmente impedida por barreiras ecológicas.

#### Borboletas (Insecta, Lepidoptera)

##### *Gonepteryx maderensis* (Fig. 12a)

A distribuição predita de *G. maderensis* traduz a importância da variável de vegetação nativa utilizada no modelo. De facto, esta borboleta está intimamente ligada à floresta húmida de Laurissilva e a distribuição obtida pelo modelo de predição é muito próxima da distribuição actual deste habitat. No entanto, existem algumas áreas que foram classificadas como tendo grande probabilidade de ocorrer *G. maderensis*, mas onde não existem importantes manchas de Laurissilva, tais como na zona mais sudeste da ilha. Do mesmo modo, a sua ocorrência na Península da Ponta de São Lourenço é pouco provável, já que se trata de um habitat muito seco e desfavorável. Como era esperado, a humidade relativa máxima é uma das variáveis com maior

Funduras) this beetle species has not yet been detected and, particularly in the most eastern areas, its presence seems unlikely.

#### *Orthomus susanae* (Fig. 11d)

According to the model results, *O. susanae* probably exists in some scattered populations mostly in the north of the island of Madeira. The model also identified the area surrounding Achada do Cedro Gordo as a location with a high probability for this species to occur, suggesting that future efforts to locate this recently discovered species should concentrate on this area.

In general, the modelling results have clearly identified many of the areas of species occurrence and indicated other locations where the *Orthomus* species can probably be found. However, in some aspects the models did not agree with our knowledge of the biology of these species. For example, the results achieved for *O. dilaticollis* (Fig. 11b), a stenotopic species, were unexpected, particularly when compared with the results obtained for its more widespread congener *O. curtus* (Fig. 11a). The inaccuracies of the results for specific areas of the Laurissilva forest certainly reflect the lack of microenvironmental variables within the set of predictors used. These variables are determining for the occurrence of these ground beetle species (such as soil pH, soil humidity, litter density) and are not always correlated with coarse-scale climatic variables. On the other hand, by not considering the role of historical/biogeographic variables in explaining the distribution patterns of the *Orthomus* spp., the models also indicate a high probability of occurrence of these species in several isolated areas. These areas are the equivalent of ecological islands and, despite presenting similar environmental conditions to the ones where the *Orthomus* species have been recorded, ecological barriers have probably prevented their colonisation.

#### Butterflies (Insecta, Lepidoptera)

##### *Gonepteryx maderensis* (Fig. 12a)

The predictive distribution model for *G. maderensis* reflects the importance of the native vegetation variable. In fact, this butterfly is intimately related to the indigenous humid Laurel forest, and the predicted distribution comes very close to the boundaries of this ecosystem. However, there are some localities classified as having high probability for the presence of *G. maderensis* that are situated in areas we know are devoid of any important patches of Laurissilva, such as the southeast corner of the island. Likewise, its occurrence in the Ponta de São Lourenço Peninsula, which is a dry and unsuitable ecosystem, is unlikely. As one could expect, the maximum relative humidity stands as the most influential variable, and is directly

influência na distribuição desta espécie, facto que está directamente associado às características intrínsecas da floresta húmida de Laurissilva.

#### *Hipparchia maderensis* (Fig. 12b)

O actual conhecimento acerca da capacidade de voo e as preferências de habitat de *H. maderensis* permitem-nos pensar que a borboleta se encontra preferencialmente a altitudes acima dos 1000 m. A predição da distribuição da espécie corrobora esta ideia e deve estar próxima da realidade. Provavelmente devido a este facto, o modelo preditivo apresenta a temperatura mínima como um dos factores principais que afectam a distribuição da espécie. A precipitação também provou ser um preditor importante, e zonas com grande probabilidade de ocorrência da espécie (de 0,55 a 0,88) coincidem com valores de precipitação anual que variam entre 1600 e mais de 2800 mm. Algumas variáveis de uso do solo como os terrenos agrícolas, e em particular a vegetação mista, também mostraram ter influência na distribuição de *H. maderensis*.

#### Aves

Uma breve análise dos resultados de modelação é apresentada abaixo, tendo em consideração os dados publicados (recentes e históricos) acerca da distribuição dos *taxa* analisados, assim como outros registos não publicados de um dos autores deste estudo (P. Oliveira).

#### *Anthus berthelotii madeirensis* (Fig. 13a)

O modelo preditivo de distribuição de *Anthus berthelotii madeirensis* identificou várias áreas isoladas no maciço montanhoso central da ilha da Madeira, onde a presença desta espécie é altamente provável. Este resultado está de acordo com informação pontual e/ou não publicada reunida para a região. A grande probabilidade de ocorrência da espécie nos extremos ocidental e oriental da ilha, nomeadamente a Ponta de São Lourenço e a Ponta do Pargo, é também corroborada com informação de campo colhida por alguns dos autores deste estudo e outros investigadores (e.g. Câmara 1995). No entanto, não é tão evidente a explicação da grande probabilidade de ocorrência dada para algumas zonas costeiras isoladas no Norte da ilha, nomeadamente entre Porto da Cruz e São Jorge. Contudo, é possível que nesta área esteja presente um habitat favorável para a espécie, e, de futuro, dever-se-á prestar mais atenção a essas pequenas fajãs distribuídas ao longo da costa.

#### *Carduelis cannabina guentheri* (Fig. 13b)

A modelação da distribuição de *Carduelis cannabina guentheri* identifica um grande número de quadrados contíguos, a maior parte localizada a baixa altitude, onde a presença da espécie é altamente provável. Este resultado não está de acordo com a distribuição actualmente conhecida da espécie, a qual é muito menor. Em contrapartida, é congruente com os dados históricos que suportam uma abundância maior distribuída por toda a ilha (ver Bannermam & Banner-

associated with the intrinsic characteristics of the humid Laurissilva habitat.

#### *Hipparchia maderensis* (Fig. 12b)

The actual knowledge of flight range and habitat preferences of *H. maderensis* tells us that this butterfly is more commonly found at altitudes above 1,000 m.a.s.l.. The predicted distribution is very illustrative of this idea and may be very close to reality. Probably because of this, the model shows that the most important factor affecting its distribution is minimum temperature. Precipitation was also an important predictor; zones with high probability (0.55-0.88) for the presence of *H. maderensis* coincide with values of annual precipitation ranging from 1,600 to more than 2,800 mm. Indeed, some land-use variables had an effect on the predicted distribution, namely agricultural land and, especially, mixed vegetation.

#### Birds

A brief analysis of the modelling results is presented below taking in consideration the published (recent and historical) data on the distribution of the species, together with unpublished records from one of the authors (P. Oliveira).

#### *Anthus berthelotii madeirensis* (Fig. 13a)

The predictive distribution model for *Anthus berthelotii madeirensis* identified several isolated areas within the central mountainous massif of Madeira where the presence of this species is highly probable. In fact, this concurs with non-systematic and/or unpublished information gathered in such areas. The high probability of occurrence of this species in the westerly and easterly extremes of the island, namely Ponta de São Lourenço and Ponta do Pargo, is also corroborated by field information collected by us and others as well (e.g. Câmara 1995). The high probability of occurrence in some isolated coastal areas on the north of the island, namely between Porto da Cruz and São Jorge, is not easily explained. However, we agree that potential habitat might be present, and further attention should be paid to a number of small “fajãs” (Madeiran designation for a flat portion of land originated by a recent or old landslide) scattered along the coast.

#### *Carduelis cannabina guentheri* (Fig. 13b)

The distribution modelling for *Carduelis cannabina guentheri* identified a large number of contiguous squares, mostly located at the lower altitudes of the island, where the presence of this species is highly probable. This does not agree with the presently known distribution range of the species, which is much smaller. On the other hand, it is fully supported by historical data, accounting for a much bigger abundance all over the island (see Bannermam &

man 1965 e referências neste artigo). Actualmente, acredita-se que a população de *Carduelis cannabina guentheri* possa ter aumentado e será interessante verificar se a distribuição futura da espécie irá seguir a predita. A modelação da distribuição mostra também que esta *subespécie* endémica está bem adaptada a habitats com influência humana.

#### *Carduelis chloris* (Fig. 13c)

Os resultados da distribuição de *Carduelis chloris* mostraram uma grande probabilidade de ocorrência da espécie em muitos quadrados contíguos, sobretudo a Sul da ilha. Este resultado está de acordo com a informação actual em relação à distribuição e abundância da espécie. O modelo não estimou a presença da espécie em áreas urbanas, como a do Funchal, onde é frequentemente observada em jardins. É interessante notar que, apesar de se acreditar que a população está a aumentar, todas as áreas que foram estimadas como sendo de grande probabilidade de ocorrência da espécie já estão ocupadas.

Em geral, os resultados de modelação identificaram claramente muitas das áreas onde as três espécies ocorrem actualmente. Para além do mais, a modelação de *Anthus berthelotii madeirensis* identificou outros locais onde a ave poderá ocorrer. Para a espécie *Carduelis cannabina guentheri* foi corroborada a ideia de que as populações podem estender-se para uma área de distribuição mais ampla de habitat favorável. Os resultados também confirmaram a ideia de que *Carduelis cannabina* e *Carduelis chloris* estão bem adaptadas a habitats alterados pelo Homem. Em alguns casos mais específicos, os resultados do modelo não são congruentes com os nossos dados de campo, apesar de não ser fácil identificar as razões que levam a essa incongruência.

## 5. Conclusões

Os modelos de predição da distribuição de espécies obtidos a partir do *Maxent* foram realizados com base em dados de presença de espécies, fornecidos por amostragens padronizadas (e.g. carabídeos), informação espacial da base de dados do ATLANTIS (e.g. moluscos) e informação de trabalhos publicados. Optámos por utilizar uma técnica de modelação que tivesse em conta apenas a presença das espécies, uma vez que não estavam disponíveis dados de ausência fiáveis para a maior parte das espécies. Com o uso desta técnica, aproximamo-nos da distribuição potencial da espécie com base na adequabilidade de diferentes áreas da ilha para determinados factores ambientais. Pelo contrário, a inclusão de variáveis de uso do solo desvia os resultados de uma distribuição potencial para uma distribuição real (i.e. onde a espécie efectivamente ocorre no presente). A posição exacta da distribuição de uma espécie neste gradiente entre os extremos de distribuição potencial e de distribuição real é, no entanto, desconhecida. A técnica do *Maxent* utiliza pseudo-ausências seleccionadas a partir dos dados de distribuição originais, uma abordagem que precisa de ser mais bem avaliada. Dado o pequeno número

Bannerman 1965 and references therein). Nowadays, it is believed that the population might be increasing, and it will be interesting to see if the future distribution of the species will follow the prediction. From another perspective, the distribution modelling shows that this endemic subspecies is well adapted to humanized habitats.

#### *Carduelis chloris* (Fig. 13c)

The results of predictive distribution modelling for *Carduelis chloris* showed a high probability of species occurrence mostly in the south of the island, where many contiguous squares of high probability were identified. This agrees with current general information on the distribution and abundance of the species. The model failed to predict the presence of this bird in urban areas, namely Funchal where it is frequently seen in gardens. It is interesting to note that although the population is believed to be increasing, all the predicted areas with a higher probability of occurrence are already occupied.

In general, the modelling results have clearly identified many of the areas where these three species occur. Furthermore, for *Anthus berthelotii madeirensis* the model showed other locations where the bird can be found, and for *Carduelis cannabina guentheri* the idea that the population can expand to a much wider area of suitable habitat was corroborated. The findings also confirmed the idea that *Carduelis cannabina* and *Carduelis chloris* are two *taxa* well adapted to live in close association with habitats changed by humans. In relation to a few more specific aspects the findings of the model did not agree with our field knowledge, and the reasons for this disagreement are difficult to identify.

## 5. Conclusions

Our *Maxent* models were done with presence data provided by standardised intensive surveys (e.g. ground beetles), spatial information provided by ATLANTIS database (e.g. molluscs) and data extracted from the literature. We decided to use a presence-only technique because reliable absence data were not available for most of the species. The use of such a technique implies that we are obtaining an approximation for the potential distribution of the species according to the environmental adequacy of the different areas of the island. On the contrary, the inclusion of land-use variables moves away from the potential distribution, and approaches the true distribution (i.e. where the species is actually present). As a consequence the exact position in the gradient defined by the potential-realised extremes is unknown. *Maxent* uses pseudo-absences selected from the background data, an approach that deserves a more critical evaluation. Because of the low sample sizes, no model could be evaluated with external data; instead, we preferred to use all the available information for the training process. Raes & Steege (2007) have recently proposed a technique that avoids the need to divide the original data



de amostras disponíveis, preferimos incluir todos os dados de distribuição na modelação e não deixar de parte dados originais de distribuição para contrastar com os resultados obtidos com os modelos preditivos. Recentemente, Raes & Steege (2007) propuseram o uso de um modelo nulo para testar se a distribuição predita de uma espécie difere de uma distribuição ao acaso. O uso desta técnica dispensaria que se deixasse de lado dados de distribuição para depois comparar com os resultados obtidos com o modelo predito. Esperamos que este método promissor possa ser disponibilizado brevemente em programas informáticos. Apesar de tudo, é preferível utilizar os modelos preditivos disponíveis, mesmo sem a possibilidade de testar os resultados preditos, a não utilizar modelos preditivos de distribuição (Miller *et al.* 2004). Obviamente, tem de se ter em conta que a aplicabilidade destes modelos é limitada e que têm de ser usados com precaução. Acreditamos que o uso destas técnicas para a área da conservação só deverá ser generalizado quando se confirmar que têm um poder preditivo fiável. Uma das aplicações mais directas dos modelos preditivos é na identificação de áreas que necessitam de uma amostragem mais exaustiva. Os dados adicionais poderão depois ser utilizados para testar o modelo preditivo.

Em relação à análise dos modelos preditivos de distribuição apresentados neste trabalho, evidencia-se a falta de preditores adequados, sobretudo variáveis que tenham em consideração os factores ou efeitos históricos que actuam a escalas espaciais mais pequenas, o que leva necessariamente a uma sobrestimação da amplitude espacial da distribuição actual de uma espécie. Este fenómeno é bem evidente nos modelos obtidos para os carabídeos e reveste-se de particular importância quando se espera que os modelos preditivos sejam aplicados na conservação das espécies sem dados ecológicos e de campo disponíveis, como acontece com a maioria das espécies de invertebrados. No entanto, uma utilização cuidadosa dos resultados obtidos com os modelos preditivos e um bom conhecimento ecológico da espécie permitem o uso eficaz de modelos de distribuição para descrever e estudar a distribuição das espécies e as suas respostas a determinados factores geográficos e ambientais.

## 6. Agradecimentos

Agradecemos à Alison Neilson e à Isabel A. Rosário pela revisão da versão inglesa deste capítulo. Os dados climáticos foram obtidos no âmbito dos projectos CLIMAAT e CLIMARCOST, PIC – INTERREG\_IIIB (MAC 2.3/A3 e 05/MAC/2.3/A1). O projecto ATLÂNTICO – INTERREG IIIB, com a permissão do Instituto Geográfico do Exército, disponibilizou a informação espacial digitalizada da ilha da Madeira. O trabalho de campo na Madeira, de P.A.V. Borges, A. Serrano e M. Boieiro, foi suportado pelo projecto “Áreas de Elevado Endemismo no Arquipélago da Madeira – Identificação de prioridades para a conservação da fauna endémica de insectos” (PDCT/BIA-BDE/59202/2004), financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

set using a null-model methodology, which allows testing whether the discrimination capacity of models differ from chance. We hope this new method will be soon implemented in available software packages. Nevertheless, untested predictions are preferable to none (Miller *et al.* 2004). This implies the need for caution in use and limits the applicability of species distribution models. We strongly believe that the use of these techniques for practical conservation purposes must not be generalised until they show undeniable predictive reliability. The identification of areas that deserve further surveys is among the main direct uses of these models, and such additional work could be used as an evaluation test. The results from the models and their interpretation by experts show the drawbacks caused by the lack of suitable predictors, especially those accounting for historical factors or effects acting at small scales, which makes overprediction of the realised distributions common. This is well-illustrated in the case of ground beetles, and is of special concern when the models are expected to be applied for conservation purposes where a complete lack of ecological and field knowledge is available, as in the case of most invertebrate species. A cautious use of model outputs together with good knowledge of the studied species might, however, allow us to use species distribution models fruitfully to describe and study the geographical and environmental responses of species.

## 6. Acknowledgements

We thank Alison Neilson and Isabel A. Rosário for their review of the English version. Climate data was obtained from Project CLIMAAT, PIC – INTERREG\_IIIB (MAC 2.3/A3). Spatial digital information of Madeira Island was obtained from Project ATLÂNTICO – INTERREG IIIB, with the permission of “Instituto Geográfico do Exército”. P.A.V. Borges, A. Serrano and M. Boieiro got support for fieldwork on Madeira Island from the project “Áreas de Elevado Endemismo no Arquipélago da Madeira – Identificação de prioridades para a conservação da Fauna endémica de insectos” (PDCT/BIA-BDE/59202/2004), financed by the Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

## 7. Referências bibliográficas | References

- Anderson, R.P., Gómez-Laverde, M. & Peterson, A.T. (2002) Geographical distributions of spiny pocket mice in South America: insights from predictive models. *Global Ecology and Biogeography*, **11**, 131-141.
- Anónimo (1991) *Cartografia da Ocupação dos Solos, Estudo Pormenorizado dos Solos, Classificação da Aptidão da Terra para Usos Específicos” e “fornecimento de um Sistema Informático para consulta e gestão interactiva de dados”*. GEOMETRAL, Região Autónoma da Madeira.
- Araújo, M.B. & Williams, P.H. (2000) Selecting areas for species persistence using occurrence data. *Biological Conservation*, **96**, 331-345.
- Azevedo, E.B. (1996) *Modelação do Clima Insular à Escala Local. Modelo CIELO aplicado à ilha Terceira*. PhD Thesis, Universidade dos Açores, Angra do Heroísmo.
- Azevedo, E.B. (2003) *Projecto CLIMAAAT – Clima e Meteorologia dos Arquipélagos Atlânticos*. PIC Interreg\_IIIB – Mac 2.3/A3.
- Azevedo, E.B. (2006) *Projecto CLIMARCOST – Clima Marítimo e Costeiro*. PIC Interreg\_IIIB – 05/Mac/2.3/A1.
- Azevedo, E.B., Pereira, L.S. & Itier, B. (1999) Modelling the local climate in island environments: water balance applications. *Agricultural Water Management*, **40**, 393-403.
- Balmford, A. & Bond, W. (2005) Trends in the state of nature and their implications for human well-being. *Ecology Letters*, **8**, 1218-1234.
- Bannerman, D. & Bannerman, W. (1965) *Birds of the Atlantic Islands. A history of the Birds of Madeira, the Desertas, and the Porto Santo Islands*. Oliver and Boyd, Edinburgh.
- Biber, E. (2002) Patterns of endemic extinctions among island bird species. *Ecography*, **25**, 661-676.
- Bischler, H. (2004). Liverworts of the Mediterranean: ecology, diversity and distribution. *Bryophytorum Bibliotheca*, **61**, 1-252.
- Borges, P.A.V. (2005) Introduction. In *A list of the terrestrial fauna (Mollusca and Arthropoda) and (Bryophyta, Pteridophyta and Spermatophyta) from the Azores* (eds. P.A.V. Borges, R. Cunha, R. Gabriel, A.M.F. Martins, L. Silva & V. Vieira), pp. 11-20. Direcção Regional de Ambiente and Universidade dos Açores, Horta, Angra do Heroísmo and Ponta Delgada.
- Bustamante, J. & Seoane, J. (2004) Predicting the distribution of four species of raptors (Aves: Accipitridae) in southern Spain: statistical models work better than existing maps. *Journal of Biogeography*, **31**, 295-306.
- Cabeza, M., Araújo, M.B., Wilson, R.J., Thomas, C.D., Cowley, M.J.R. & Moilanen, A. (2004) Combining probabilities of occurrence with spatial reserve design. *Journal of Applied Ecology*, **41**, 252-262.
- Câmara, D. (1995) *Guia de Campo das Aves do Parque Ecológico do Funchal e do Arquipélago da Madeira*. Associação dos Amigos do Parque Ecológico do Funchal. Madeira, Câmara de Lobos.
- Chapin, F.S., Zavaleta, E.S., Eviner, V.T., Naylor, R.L., Vitousek, P.M., Reynolds, H.L., Hooper, D.U., Lavorel, S., Sala, O.E., Hobbie, S.E., Mack, M.V. & Díaz, S. (2000) Consequences of changing biodiversity. *Nature*, **405**, 234-242.
- Chefaoui, R.M., Hortal, J. & Lobo, J.M. (2005) Potential distribution modelling, niche characterization and conservation status assessment using GIS tools: a case study of Iberian *Copris* species. *Biological Conservation*, **122**, 327-338.
- Dobson, A.P., Rodríguez, J.P., Roberts, W.M. & Wilcove, D.S. (1997) Geographic distribution of endangered species in the United States. *Science*, **275**, 550-553.
- Dunn, R.R. (2005) Modern insect extinctions, the neglected majority. *Conservation Biology*, **19**, 1030-1036.
- Dye, T.S. & Tuggle, H.D. (1998) Land snail extinctions at Kalaheo, O’ahu. *Pacific Science*, **52**, 111.
- Eliith, J., Graham, C.H., Anderson, R.P., Dudik, M., Ferrier, S., Guisan, A., Hijmans, R.J., Huettmann, F., Leathwick, J.R., Lehmann, A., Li, J., Lohmann, L.G., Loiselle, B.A., Manion, G., Moritz, C., Nakamura, M., Nakazawa, Y., Overton, J.M.M., Peterson, A.T., Phillips, S.J., Richardson, K., Scachetti-Pereira, R., Schapire, R.E., Soberon, J., Williams, S., Wisz, M.S. & Zimmermann, N.E. (2006) Novel methods improve prediction of species’ distributions from occurrence data. *Ecography*, **29**, 129-151.
- Eyre, T.J. & Buck, R.G. (2005) The regional distribution of large gliding possums in southern Queensland, Australia. I. The yellow-bellied glider (*Petaurus australis*). *Biological Conservation*, **125**, 65-86.
- Ferrier, S. (2002) Mapping spatial pattern in biodiversity for regional conservation planning: Where to from here? *Systematic Biology*, **51**, 331-363.
- Ferrier, S., Drielsma, M., Manion, G. & Watson, G. (2002a) Extended statistical approaches to modelling spatial pattern in biodiversity in northeast New South Wales. II. Community-level modelling. *Biodiversity and Conservation*, **11**, 2309-2338.
- Ferrier, S., Watson, G., Pearce, J. & Drielsma, M. (2002b) Extended statistical approaches to modelling spatial pattern in biodiversity in northeast New South Wales. I. Species-level modelling. *Biodiversity and Conservation*, **11**, 2275-2307.
- Gaston, K.J., Blackburn, T.M. & Lawton, J.H. (1997) Interspecific abundance-range size relationships: an appraisal of mechanisms. *Journal of Animal Ecology*, **66**, 579-601.
- Gaston, K.J. & Blackburn, T.M. (2000) *Pattern and process in macroecology*. Blackwell Science, Oxford.
- Gibson, L.A., Wilson, B.A., Cahill, D.M. & Hill, J. (2004) Spatial prediction of rufous bristlebird habitat in a coastal heathland: a GIS-based approach. *Journal of Applied Ecology*, **41**, 213-223.
- Guisan, A. & Thuiller, W. (2005) Predicting species distributions: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, **8**, 993-1009.
- Guisan, A. & Zimmermann, N.E. (2000) Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, **135**, 147-186.
- Hammond, P.M. (1994) Practical approaches to the estimation of the extent of biodiversity in speciose groups. *Philosophical Transactions of the Royal Society, series B*, **345**, 119-136.
- Hernández, P.A., Graham, C.H., Master, L.L. & Albert, D.L. (2006) The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods. *Ecography*, **29**, 773-785.
- Hortal, J., Borges, P.A.V., Dinis, F., Jiménez-Valverde, A., Chefaoui, R.M., Lobo, J.M., Jarroca, S., Azevedo, E.B., Rodrigues, C., Madruga, J., Pinheiro, J., Gabriel, R., Cota Rodrigues, F. & Pereira, A.R. (2005) Using ATLANTIS – Tierra 2.0 and GIS environmental information to predict the spatial distribution and habitat suitability of endemic species. In *A list of the terrestrial Fauna (Mollusca and Arthropoda) and flora (Bryophyta, Pteridophyta and Spermatophyta) from the Azores* (eds. P.A.V. Borges, R. Cunha, R. Gabriel, A.F. Martins, L. Silva and V. Vieira), pp. 69-113. Direcção Regional de Ambiente and Universidade dos Açores, Horta, Angra do Heroísmo and Ponta Delgada.
- Howard, P.C., Viskanic, P., Davenport, T.R.B., Kigenyi, F.W., Baltzer, M., Dickinson, C.J., Lwanga, J.S., Matthews, R.A. & Balmford, A. (1998) Complementarity and the use of indicator groups for reserve selection in Uganda. *Nature*, **394**, 472-475.
- Hurlbert, A.H. & Jetz, W. (2007) Species richness, hotspots, and the scale dependence of range maps in ecology and conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **104**, 13384-13389.
- Huston, M.A. (2002) Critical issues for improving predictions. In *Predicting Species Occurrences: Issues of Accuracy and Scale* (eds. J.M. Scott, P.J. Heglund, M.L. Morrison, J.B. Haufler, M.G. Raphael, W.A. Wall, & F.B. Samson), pp. 7-21. Island Press, Washington.

- Izquierdo, I., Martín, J.L., Zurita, N. & Arechavaleta, M. (2001) *Lista de Especies Silvestres de Canarias. Hongos, Plantas y Animales*. Consejería de Política Territorial y Medio Ambiente, Gobierno de Canarias, Santa Cruz de Tenerife.
- Jiménez-Valverde, A. & Lobo, J.M., (2006) Distribution determinants of endangered Iberian spider *Macrothele calpeiana* (Araneae, Hexathelidae). *Environmental Entomology*, **35**, 1491-1499.
- Jiménez-Valverde, A. & Lobo, J.M. (2007) Potential distribution of the endangered spider *Macrothele calpeiana* (Walckenaer, 1805) (Araneae, Hexathelidae) and the impact of climate warming. *Acta Zoologica Sinica*, **53**, 865-876.
- Jiménez-Valverde, A., Lobo, J.M. & López Martos, M.L. (2006) Listado de especies actualizado de los araneidos y tomisidos (Araneae, Araneidae & Thomisidae) de la Comunidad de Madrid: mapas de distribución conocida, potencial y patrones de riqueza. *Graellsia*, **62**, 461-481.
- Jiménez-Valverde, A., Ortuño, V.M. & Lobo, J.M. (2007) Exploring the distribution of *Sterocorax* Ortuño, 1990 (Coleoptera, Carabidae) species in the Iberian Peninsula. *Journal of Biogeography*, **34**, 1426-1438.
- Jiménez-Valverde, A., Gómez, J.F., Lobo, J.M., Baselga, A. & Hortal, J. (2008) Challenging distribution models: the case of *Maculinea nausithous* (Bergsträsser, 1779) in the Iberian Peninsula. *Annales Zoologici Fennici*, in press.
- Johnston, C.A. (1998) *Geographic Information Systems in Ecology*. Blackwell Science, Oxford.
- Lawton, J.H. & May, R.M. (1995) *Extinction Rates*. Oxford University Press, Oxford.
- Lobo, J.M., Verdú, J.R. & Numa, C. (2006) Environmental and geographical factors affecting the Iberian distribution of flightless *Jekelius* species (Coleoptera: Geotrupidae). *Diversity and Distributions*, **12**, 179-188.
- Mace, G.M., Baillie, J., Masundire, H., Ricketts, T.H., Brooks, T.M., Hoffmann, M., Stuart, S., Balmford, A., Purvis, A., Reyers, B., Wang, J., Revenga, C., Kennedy, E.T., Naeem, S., Alkemade, R., Allnutt, T., Bakarr, M., Bond, W., Chanson, J., Cox, N., Fonseca, G., Hilton-Taylor, C., Loucks, C., Rodrigues, A., Sechrest, W., Stattersfield, A.J., van Rensburg, B. & Whiteman, C. (2005) Biodiversity. In *Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends: Findings of the Condition and Trends Working Group V.1* (eds. R. Hassan, R. Scholes and N. Ash). Island Press, Washington.
- Machado, A. (1995) Ground beetles of Macaronesia, an overview (Coleoptera, Carabidae). *Boletim do Museu Municipal do Funchal, Sup 4*, 395-410.
- McPherson, J.M. & Jetz, W. (2007) Effects of species' ecology on the accuracy of distribution models. *Ecography*, **30**, 135-151.
- Miller, J.R., Turner, M.G., Smithwick, E.A.H., Dent, C.L. & Stanley, E.H. (2004) Spatial extrapolation: the science of predicting ecological patterns and processes. *BioScience*, **54**, 310-320.
- Nicholls, A.O. (1989) How to make biological surveys go further with Generalised Linear Models. *Biological Conservation*, **50**, 51-75.
- Oliveira, P. & Menezes, D. (2004) *Birds of the Archipelago of Madeira*. Serviço do Parque Natural da Madeira / Arquipélago Verde. Funchal, Madeira.
- Pearce, J.L., Cherry, K., Drielsma, M., Ferrier, S. & Whish, G. (2001) Incorporating expert opinion and fine-scale vegetation mapping into statistical models of faunal distribution. *Journal of Applied Ecology*, **38**, 412-424.
- Pearce, J.L. & Venier, L. A. (2006) The use of ground beetles (Coleoptera: Carabidae) and spiders (Araneae) as bioindicators of sustainable forest management: a review. *Ecological Indicators*, **6**, 780-793.
- Peterson, A.T. & Holt, R.D. (2003) Niche differentiation in Mexican birds: using point occurrences to detect ecological innovation. *Ecology Letters*, **6**, 774-782.
- Peterson, A.T. & Vieglais, D.A. (2001) Predicting species invasions using ecological niche modeling: new approaches from bioinformatics attack a pressing problem. *BioScience*, **51**, 363-371.
- Peterson, A.T. (2003a) Projected climate change effects on Rocky Mountain and Great Plains birds: generalities of biodiversity consequences. *Global Change Biology*, **9**, 647-655.
- Peterson, A.T. (2003b) Predicting the geography of species' invasions via ecological niche modelling. *The Quarterly Review of Biology*, **78**, 419-433.
- Peterson, A.T., Soberón, J. & Sánchez-Cordero, V. (1999) Conservatism of ecological niches in evolutionary time. *Science*, **285**, 1265-1267.
- Phillips, S.J., Dudík, M. & Schapire, R.E. (2004) A maximum entropy approach to species distribution modeling. In: *Proceedings of the 21st International Conference on Machine Learning*, ACM Press, New York, pp. 655-662.
- Phillips, S.J., Anderson, R.P. & Schapire, R.E. (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, **190**, 231-259.
- Pimm, S.L. & Raven, P. (2000) Extinction by numbers. *Nature*, **403**, 843-845.
- Pimm, S.L., Russell, G.J., Gittleman, J.L. & Brooks, T.M. (1995) The future of biodiversity. *Science*, **269**, 347-350.
- Raes, N. & Steege, H. (2007) A null-model for significance testing of presence-only species distribution models. *Ecography*, in press.
- Rainio, J. & Niemela, J. (2003) Ground beetles (Coleoptera: Carabidae) as bioindicators. *Biodiversity and Conservation*, **12**, 487-506.
- Richardson, B.J., Zabka, M., Gray, M.R. & Milledge, G. (2006) Distributional patterns of jumping spiders (Araneae: Salticidae) in Australia. *Journal of Biogeography*, **33**, 707-719.
- Sánchez-Cordero, V., Cirelli, V., Munguía, M. & Sarkar, S. (2005) Place prioritization for biodiversity representation using species' ecological niche modeling. *Biodiversity Informatics*, **2**, 11-23.
- Santos, F.D., Valente, M.A., Miranda, P.M.A., Aguiar, A., Azevedo, E.B., Tomé, A.R. & Coelho, F. (2004) Climate change scenarios in the Azores and Madeira islands. *World Resource Review*, **16**, 473-491.
- Scott, J.M., Heglund, P.J., Haufler, J.B., Morrison, M., Raphael, M.G., Wall, W.B. & Samson, F. (Eds.) (2002) *Predicting species occurrences: Issues of accuracy and scale*. Island Press, Covelo, California.
- Seoane, J., Bustamante, J. & Díaz-Delgado, R. (2005) Effect of expert opinion on the predictive ability of environmental models of bird distribution. *Conservation Biology*, **19**, 512-522.
- Seoane, J., Justribó, J.H., García, F., Retamar, J., Rabadán, C. & Atienza, J.C. (2006) Habitat-suitability modelling to assess the effects of land-use changes on Dupont's lark *Chersophilus duponti*: A case study in the Layna Important Bird Area. *Biological Conservation*, **128**, 241-252.
- Sérgio, C., Figueira, R. Draper, D. Menezes, R. & Sousa, J. (2007) The use of herbarium data for the assessment of red list categories: Modelling bryophyte distribution based on ecological information. *Biological Conservation*, **135**, 341-351.
- Serrano, A.R.M., Aguiar, C.A.S., Boieiro, M., Borges, P.A.V., Rego, C., Amorim, I.R., Ribeiro, S.P. & Pereira, F. (subm.) A new species of *Orthomus* Chaudoir, 1838 (Coleoptera Carabidae) from Madeira Island (Macaronesia) and notes on related species. *Zootaxa*
- Serrano, A.R.M. & Boieiro, M. (2008) Coleoptera (Caraboidea). In *A list of the terrestrial fauna and flora from Madeira*. (eds. P.A.V. Borges, C. Abreu, A.M.F. Aguiar, P. Carvalho, S. Fontinha, R. Jardim, I. Melo, P. Oliveira, A.R.M. Serrano, & P. Vieira), pp. 310-313. Direcção Regional do Ambiente da Madeira and Universidade dos Açores, Funchal and Angra do Heroísmo.
- Stork, N.E. (1997) Measuring global biodiversity and its decline. In *Biodiversity II: Understanding and Protecting our Biological Resources* (eds. M.L. Reaka-Kudla, D.O. Wilson & E.O. Wilson), pp. 41-68. Joseph Henry Press, Washington D.C.



- 
- Thuiller, W., Lavorel, S., Araújo, M.B., Sykes, M.T. & Prentice, I.C. (2005) Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, **102**, 8245-8250.
- Tomé, R.F.D (2007) – *Distribuição de precipitação e vento na Ilha da Madeira: um estudo comparativo com vários modelos de alta resolução* – Tese de Mestrado em Ciências e Engenharia da Terra. Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Departamento de Física.
- van Jaarsveld, A.S., Freitag, S., Chown, S.L., Muller, C., Koch, S., Hull, H., Bellamy, C., Krüger, M., Endrödy-Younga, S., Mansell, M.W. & Scholtz, C.H. (1998) Biodiversity assessment and conservation strategies. *Science*, **279**, 2106-2108.
- Wakeham-Dawson, A., Franquinho Aguiar, A.M. & Martin, G. (2002) The distribution of endemic butterflies (Lepidoptera) on the island of Madeira, Portugal, since 1850, with comments on their current conservation status. *Entomologists' Gazette*, **53**, 153-180.
- Wallace, K.J. (2007) Classification of ecosystem services: Problems and solutions. *Biological Conservation*, **139**, 235-246.
- Wiens, J.J. & Graham, C.H. (2005) Niche conservatism: integrating evolution, ecology, and conservation biology. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, **36**, 519-539.
- Wilson, E.O. (2001) *The diversity of Life. New Edition*. Penguin Books, London.