



Construção de um sistema de modelos para simulação computacional da limitação natural de pragas

Maria Catarina Paz ^{1*}, Raquel Barreira ^{2,3}, Luís Amaro ^{1,4}, José Paulo Sousa ⁴, Jacinto Benhadi-Marín ⁵, Mykola Rasko ⁴, António Alves da Silva ⁴, Joana Alves ⁴, Rúben Mina ⁴, Andrey Chuhutin ⁶, Xiaodong Duan ⁶, Christopher John Topping ⁶ & Sónia A.P. Santos ^{1,7}

¹Instituto Politécnico de Setúbal, ESTBarreiro, CIQuiBio, Lavradio, Portugal; * catarina.paz@estbarreiro.ips.pt.

² Instituto Politécnico de Setúbal, ESTBarreiro, INCITE, Lavradio, Portugal.

³ CMAFciO – Centro de Matemática, Aplicações Fundamentais e Investigação Operacional, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.

⁴ Universidade de Coimbra, Centre for Functional Ecology, Departamento de Ciências da Vida, Coimbra, Portugal.

⁵ Centro de Investigação de Montanha (CIMO), Instituto Politécnico de Bragança, Campus de Santa Apolónia, Bragança, Portugal.

⁶ Department of Bioscience, Aarhus University, Kalø, Denmark.

⁷LEAF—Linking Landscape, Environment, Agriculture and Food Research Center, Associated Laboratory TERRA, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisboa, Portugal

Resumo

A limitação natural de pragas é um serviço de ecossistema que deve ser promovido nos sistemas agrícolas, já que pode ser usada como alternativa, ou complementarmente, à aplicação de pesticidas. Consiste no consumo das pragas pelos seus inimigos naturais e pode ser promovida através do estabelecimento de componentes paisagísticas que forneçam, a estes inimigos das pragas, alimento alternativo e refúgio, para além da aplicação de práticas agrícolas sustentáveis. No entanto, o delineamento de uma estratégia eficaz de limitação natural de pragas está dependente da caracterização detalhada dos comportamentos dos animais que fazem parte dessa cadeia trófica, nomeadamente, das pragas e dos seus predadores, o que pode ser feito através de simulações computacionais. Neste contexto, e no âmbito do projeto OLIVESIM, estamos a construir um sistema de modelos para simular a biologia e o comportamento de duas espécies de artrópodes (1) a mosca-da-azeitona, *Bactrocera oleae* (Rossi), praga chave da oliveira, e (2) a aranha de solo, *Haplodrassus rufipes* (Lucas), um dos potenciais predadores da praga, e as suas interações com a paisagem selecionada para realizar este estudo, localizada na região de Trás-os-Montes (Mirandela, Portugal) e caracterizada fundamentalmente por olival tradicional. Para isso, está a ser utilizado o sistema ALMaSS (Animal, Landscape and Man Simulation System), que recebe inputs diários de variáveis climáticas e também de ações de gestão agrícola, e que é calibrado com dados sobre abundância quantitativa e qualitativa de animais. Neste simpósio focamo-nos nestes dois modelos, mostrando também o estado atual deste trabalho.

Palavras-chave: Olival, *Bactrocera oleae*, *Haplodrassus rufipes*, ALMaSS, simulação computacional



Abstract

Building a system of computational models to simulate natural pest control

Natural pest control is an ecosystem service that should be promoted in agricultural systems, as it can be used as an alternative or complementary to pesticide application. It consists in increasing the populations of natural pest enemies by establishing landscape components that provide them with alternative food and refuge, and by applying sustainable agricultural practices. However, the design of an effective strategy for natural pest control depends on the detailed characterization of the behaviour of animals that are part of this trophic chain, namely pests and their predators, which can be done through computational simulations. In this context, and in the scope of project OLIVESIM, we are building a system of models to simulate the biology and behaviours of two species (1) the olive fly, *Bactrocera oleae* (Rossi), key pest of the olive tree, and (2) a ground spider, *Haplodrassus rufipes* (Lucas), one of the potential predators of the pest, and their interactions with the landscape selected to carry out this study, located in the region of Trás-os-Montes (Mirandela, Portugal) and characterized primarily by traditional olive groves. For this, the ALMaSS (Animal, Landscape and Man Simulation System) system is being used, which receives daily inputs of climatic variables and agricultural management actions, and which is calibrated with data on quantitative and qualitative abundance of animals. In this symposium, we focus on the models for these two animal species, showing the current state of this work.

Keywords: Olive grove, *Bactrocera oleae*, *Haplodrassus rufipes*, ALMaSS, computational simulation

Introdução

A limitação natural de pragas é um serviço de ecossistema que consiste no aumento das populações de inimigos naturais de pragas através do estabelecimento de componentes paisagísticas que lhes forneçam alimento alternativo e refúgio. De facto, está demonstrado que uma estrutura paisagística heterogénea contribui para a redução no movimento das pragas e também para um aumento dos seus predadores (Villa et al., 2020a, 2020b).

No entanto, o delineamento de uma estratégia eficaz de limitação natural de pragas está dependente da caracterização detalhada dos comportamentos dos animais que fazem parte dessa cadeia trófica, nomeadamente, das pragas e dos seus predadores, o que pode ser feito através de simulações computacionais. Neste contexto, o projeto OLIVESIM pretende construir um sistema de modelos para simular os comportamentos de espécies de pragas da oliveira e de seus inimigos, e as suas interações com a paisagem selecionada, localizada na região de Trás-os-Montes (Mirandela, Portugal) e caracterizada fundamentalmente por olival tradicional. Para isso, está a ser utilizado o sistema ALMaSS (Animal, Landscape and Man Simulation System), que simula alterações na estrutura da paisagem e na abundância de animais, e que recebe inputs de variáveis climáticas e também de ações de gestão agrícola. Os modelos são calibrados através da afinação dos seus parâmetros, (1) quantitativamente, por forma a que os seus resultados correspondam aos dados de abundância dos animais referentes à paisagem selecionada; ou (2) qualitativamente, por forma a que os seus resultados sejam cientificamente pertinentes.

Foram assim desenvolvidos modelos conceptuais para dois artrópodes (1) a mosca-da-azeitona, *Bactrocera oleae* (Rossi) (Diptera: Tephritidae), praga da oliveira, e para (2) a aranha



do solo *Haplodrassus rufipes* (Lucas) (Araneae: Gnaphosidae), uma espécie potencialmente predadora de mosca-da-azeitona.

A mosca-da-azeitona é considerada a praga mais importante da oliveira no Mediterrâneo (Gonçalves, 2008). O ciclo de vida deste inseto está intimamente relacionado com o desenvolvimento fenológico da oliveira, especialmente os frutos, onde as fêmeas põem os ovos. Os adultos surgem pela primeira vez na primavera e iniciam a sua atividade, alimentando-se de néctar (Tzanakakis, 2003). Durante este período, as fêmeas começam a pôr ovos em azeitonas que permaneceram nas árvores da época anterior. No início do verão, as altas temperaturas inibem a maturação dos ovários das fêmeas. Nesta fase, elas poderão dispersar-se por grandes distâncias e colonizar outros olivais (Daane e Johnson, 2010; Dinis, 2014). Quando esta pausa reprodutiva termina, e quando as azeitonas atingem o desenvolvimento adequado, as fêmeas reiniciam a postura dos ovos, que eclodem tornando-se larvas dentro da azeitona. São as larvas as causadoras de grandes perdas económicas, já que se alimentam da polpa da azeitona. Quando a postura acontece no verão e início do outono, o desenvolvimento dá-se completamente dentro da azeitona, ou seja, as larvas desenvolvem-se em pupa, das quais emergem os adultos, saindo da azeitona nesse estágio. No entanto, quando a postura é mais tardia, a larva ainda está dentro do fruto em meados do outono, caindo nessa altura para o solo, para aí pupar e passar o inverno. Emergem então os adultos na primavera seguinte (Dinis, 2014).

A aranha *H. rufipes* é um artrópode predador que habita o olival e que pode ser usado para limitar as populações de pragas da azeitona (Benhadi-Marín, 2019). Trata-se de uma aranha de solo que caça durante o crepúsculo e cujo principal habitat é o solo sob pedras (Benhadi-Marín, 2019). A fêmea põe os ovos dentro de um saco de seda, colocando-o debaixo de pedras e guardando-o até que as aranhas juvenis dele saiam. Uma vez fora do saco, a aranha juvenil alimenta-se principalmente à base de néctar. No entanto, uma vez perto da idade adulta, torna-se uma predadora generalista, preferindo outros animais, e maiores à medida que se torna mais forte. Uma das suas presas é a mosca-da-azeitona, que lhe é acessível quando pupa no solo.

Aqui apresentamos os modelos conceptuais desenvolvidos para a mosca-da-azeitona e para a aranha *H. rufipes*, descrevendo também o estado atual deste trabalho.

Material e Métodos

A área de estudo (fig. 1) localiza-se no Nordeste de Portugal, na sub-região Terra Quente, região de Trás-os-Montes, Portugal. Na Terra Quente, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger, o clima é temperado com verões quentes e secos – Csa (Instituto Português do Mar e da Atmosfera, 2021), como resultado da orografia desta região, e que determina uma vegetação e agricultura tipicamente mediterrânicas (Associação de Municípios da Terra Quente Transmontana, 2021). A cobertura do solo consiste principalmente num mosaico de pequenas parcelas de cerca de 2–3 hectares de olival, vinha, amendoal e bosques seminaturais de azinho e outro estrato herbáceo alto. Esta estrutura paisagística permite a existência de uma elevada biodiversidade.

O método usado para o desenvolvimento dos modelos conceptuais da mosca-da-azeitona e da aranha *H. rufipes* consistiu num levantamento bibliográfico e de observações laboratoriais e de campo, por forma a estabelecer as etapas de vida de cada um destes artrópodes e as respetivas funções comportamentais, nomeadamente de (1) desenvolvimento, (2) mortalidade, (3) hibernação, (4) movimento e (5) reprodução. No quadro 1 indicamos as referências bibliográficas e os dados que mais se destacam deste levantamento. Os dados de variáveis



climáticas necessários para calcular alguns parâmetros das funções comportamentais, e para fazer correr as simulações, foram cedidos pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), e consistiram em séries temporais com resolução horária, medidas na estação meteorológica de Mirandela (fig. 1), entre 2010 e 2020, e que foram completadas e convertidas para resolução diária, através da metodologia descrita em Paz et al. (2021b).

Resultados e Discussão

A fig. 2 mostra os estádios de vida definidos nos modelos conceptuais desenvolvidos para a mosca-da-azeitona e para a aranha, e ainda outras considerações presentes nos modelos, tais como o número de indivíduos em cada estágio, a ocorrência de movimento, e o local onde ocorre cada estágio. Podemos aqui observar claramente que os dois animais se encontram no solo, quando a mosca está na fase de pupa no Outono. É neste momento que os dois modelos se encontram, permitindo assim a simulação da predação da mosca pela aranha.

A fig. 3 mostra as funções definidas nestes modelos e as variáveis das quais dependem. Para uma descrição mais detalhada dos modelos, consultar Paz et al. (2021a) e Barreira et al. (2021). Ambos os modelos são alimentados por dados climáticos, por dados de gestão agrícola e por dados paisagísticos, tais como o grau de desenvolvimento da oliveira, para a mosca, e a disponibilidade de comida e de refúgio, para a aranha.

Estes modelos conceptuais estão a ser implementados em linguagem de programação C++, como parte do sistema ALMaSS, que procede à articulação entre os modelos dos artrópodes e os faz correr sobre um modelo dinâmico da paisagem, compreendido num quadrado de 10 km². No caso da mosca-da-azeitona, devido ao elevado número de indivíduos que normalmente constituem as suas populações, a implementação do modelo obedece a uma ótica baseada na segmentação da paisagem em células que não se sobrepõem, e onde são contabilizados os indivíduos em cada passo da simulação. Já no caso da aranha *H. rufipes*, em que existem poucos indivíduos, o modelo é implementado focando-se no indivíduo em cada passo da simulação. Este último modelo computacional entrou numa fase de calibração preliminar qualitativa, em que foram implementadas as funções básicas comportamentais de desenvolvimento, mortalidade, hibernação, movimento e reprodução.

Este sistema de modelos computacionais permitirá mostrar, aos *stakeholders*, que uma gestão sustentável de pragas e doenças baseada na diminuição da dependência de pesticidas e na promoção de uma paisagem heterogénea poderá contribuir para a proteção biológica por conservação da oliveira e fomentar a existência de artrópodes tais como a espécie *H. rufipes*.

Agradecimentos

Este trabalho é financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia através do projeto PTDC/ASP-PLA/30003/2017 - OLIVESIM - Gestão dos serviços de ecossistema no olival utilizando modelos espaciais avançados; e pelo Horizonte 2020 da União Europeia através do projeto ECOSTACK (773554- H2020-SFS-2016-2017/H2020-SFS-2017-2). L.A. foi patrocinado por uma bolsa do Instituto do Ambiente, Tecnologia e Vida da Universidade de Coimbra. J.A. financiada pela FCT/MCTES com fundos nacionais (PIDDAC), através do projeto estratégico do Centre for Functional Ecology – Science for People and the Planet (UIDB/04004/2020). Os autores agradecem ao Instituto Português do Mar e da Atmosfera pelos dados climáticos medidos na estação climática de Mirandela



Referências

- Associação de Municípios da Terra Quente Transmontana. (2021, 15 May). Caracterização. <https://www.amtqt.pt/pages/298>
- Barreira, R., Paz, M.C., Amaro, L., Sousa, J.P., Benhadi-Marín, J., Rasko, M., Alves da Silva, A., Alves, J., Chuhutin, A., Topping, C.J. & Santos, A.P.S. 2021. Developing an agent-based model for *Haplodrassus rufipes* (Araneae: Gnaphosidae), a generalist predator species of olive tree pests: conceptual model outline. *Biology and Life Sciences Forum* 4:45.
- Benhadi-Marín, J. 2019. Diversity patterns of Araneae along a gradient of farming practices in olive groves: linking landscape pattern, management practices, and species interactions. Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra.
- Broufas, G. D., Pappas, M. L. & Koveos, D. S. 2009. Effect of relative humidity on longevity, ovarian maturation, and egg production in the olive fruit fly (Diptera: Tephritidae). *Annals of the Entomological Society of America* 102:70-75
- Daane, K. M. & Johnson, M. W. 2010. Olive fruit fly: managing an ancient pest in modern times. *Annual Review of Entomology* 55:155-169
- Damos, P. & Savopoulou-Soultani, M. 2012. Temperature-driven models for insect development and vital thermal requirements. *Psyche: A Journal of Entomology*: 123405.
- Dinis, A.M. 2014. Role of edaphic arthropods on the biological control of the olive fruit fly (*Bactrocera oleae*). Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Bragança.
- Genç, H. & Nation, J. L. 2008. Survival and development of *Bactrocera oleae* Gmelin (Diptera: Tephritidae) immature stages at four temperatures in the laboratory. *Ecological Entomology* 3:99-107
- Gonçalves, M.F. 2011. Control of the olive fly, *Bactrocera oleae* (Rossi), in the context of a sustainable production of olives. Tese de Doutoramento, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.
- Instituto Português do Mar e da Atmosfera. (2021, 15 May). Normais Climatológicas. <https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/>
- Malheiro, R. 2015. Olive fruit fly (*Bactrocera oleae* Rossi) – olive tree interactions: study of physical and chemical aspects. Tese de Doutoramento, Universidade do Porto.
- Molina de la Rosa, J., Jiménez Herrera, B., Ruiz Coleto, F., García Zamorano, F., Cano Rodriguez, J. & Pérez Gracia, J. 2017. Técnicas de cultivo: Plagas y enfermedades del olivo. Junta de Andalucía, Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural y Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera, Sevilla, Spain
- Paz, M.C., Santos S.A.P., Barreira, R., Rasko, Duan, X., Alves, J., Alves da Silva, A., Mina, R., Topping, C.J. & Sousa, J. 2021a. Developing a subpopulation-based model for the olive fruit fly *Bactrocera oleae* (Diptera: Tephritidae): conceptual model outline. *Proceedings of the 1st International Electronic Conference on Agronomy*, 3-7 May.
- Paz, M.C., Santos, A. P. S. & Barreira, R. 2021b. Processing of high-resolution temporal climate data for daily simulations of a complex agro-ecosystem. *Revista de Estudios Andaluces*, 42:202-219.
- Pontikakos C.M., Tsiligidis Th.A., Yialouris C.P. & Kontodimas D.C. 2012. Pest management control of olive fruit fly (*Bactrocera oleae*) based on a location-aware agroenvironmental system. *Computers and Electronics in Agriculture* 87:39-50



- Preu, M., Frieb, J.L., Breckling, B. & Schröder, W. 2020. Case study 1: olive fruit fly (*Bactrocera oleae*). In: A. von Gleich and W. Schröder (eds.), *Gene Drives at Tipping Points*, Springer, Cham: 79-101.
- Sánchez-Ramos, I., Fernández, C.E., González-Núñez, M. & Pascual, S. 2013. Laboratory tests of insect growth regulators as bait sprays for the control of the olive fruit fly, *Bactrocera oleae* (Diptera: Tephritidae). *Pest Management Science* 69:520-526.
- Tsitsipis, J. 1980. Effect of constant temperatures on larval and pupal development of olive fruit flies reared on artificial diet. *Environmental Entomology* 9:764-768.
- Tzanakakis, M.E. 2003. Seasonal development and dormancy of insects and mites feeding on olive: a review. *Netherlands Journal of Zoology* 52:87-224.
- Villa, M., Santos, S.A.P., Aguiar, C. & Pereira, J. 2020a. Plants biodiversity in olive orchards and surrounding landscapes from a conservation biological control approach. *Proceedings of the 1st International Electronic Conference on Agronomy* 3-7 May.
- Villa, M., Santos, S.A.P., Pascual, S. & Pereira, J. 2020b. Do non-crop areas and landscape structure influence dispersal and population densities of male olive moth? *Bulletin of Entomological Research* 111:1-9.
- Zolnerowich, G. & Horner, N. V. 1985. Gnaphosid spiders of north-central Texas (Araneae, Gnaphosidae). *The Journal of Arachnology* 13:79-85.



Quadros e Figuras

Quadro 1 – Referências bibliográficas e dados usados no desenvolvimento dos modelos conceptuais da mosca-da-azeitona *Bactrocera oleae* e da aranha *Haplodrassus rufipes*.

	<i>B. oleae</i>	<i>H. rufipes</i>
Estádios de vida	Dinis (2014) Malheiro (2015)	Benhadi-Marín (2019)
Funções comportamentais		
Eclusão	Broufas et al. (2009) Preu et al. (2020)	Observação em laboratório
Desenvolvimento	Geç & Nation (2008) Damos & Savopoulou-Soultani (2012) Molina de la Rosa et al. (2017)	Damos & Savopoulou-Soultani (2012) Observação em laboratório
Mortalidade	Tsitsipis (1980) Geç and Nation (2008) Sánchez-Ramos et al. (2013) Molina de la Rosa et al. (2017)	Observação de campo
Movimento	Molina de la Rosa et al. (2017) Pontikakos et al. (2012) Preu et al. (2020)	Zolnerowich & Horner (1985) Benhadi-Marín (2019)
Reprodução	Broufas et al. (2009)	Observação em laboratório
Hibernação	Gonçalves (2011)	Observação de campo

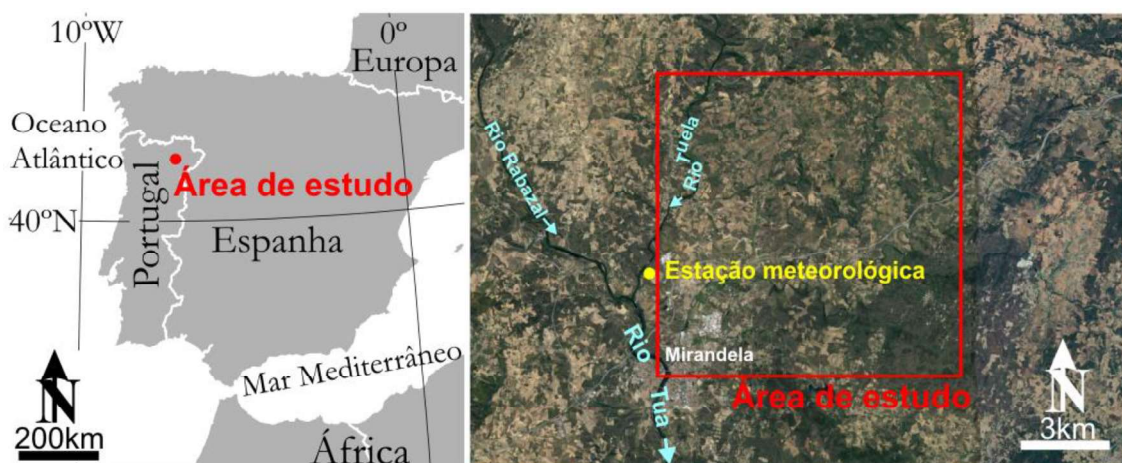
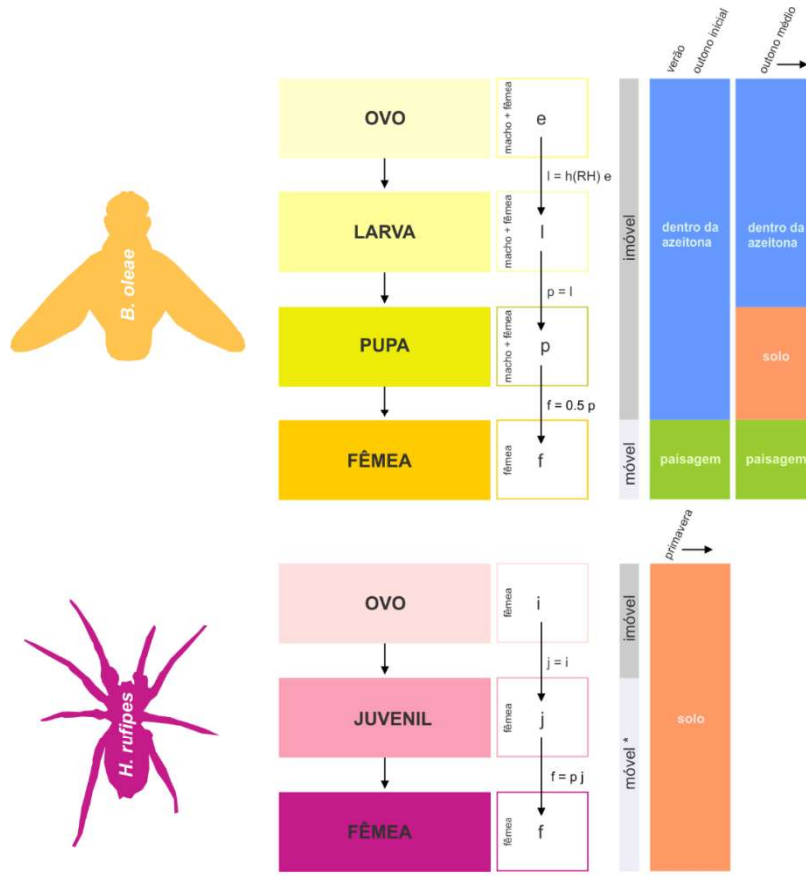
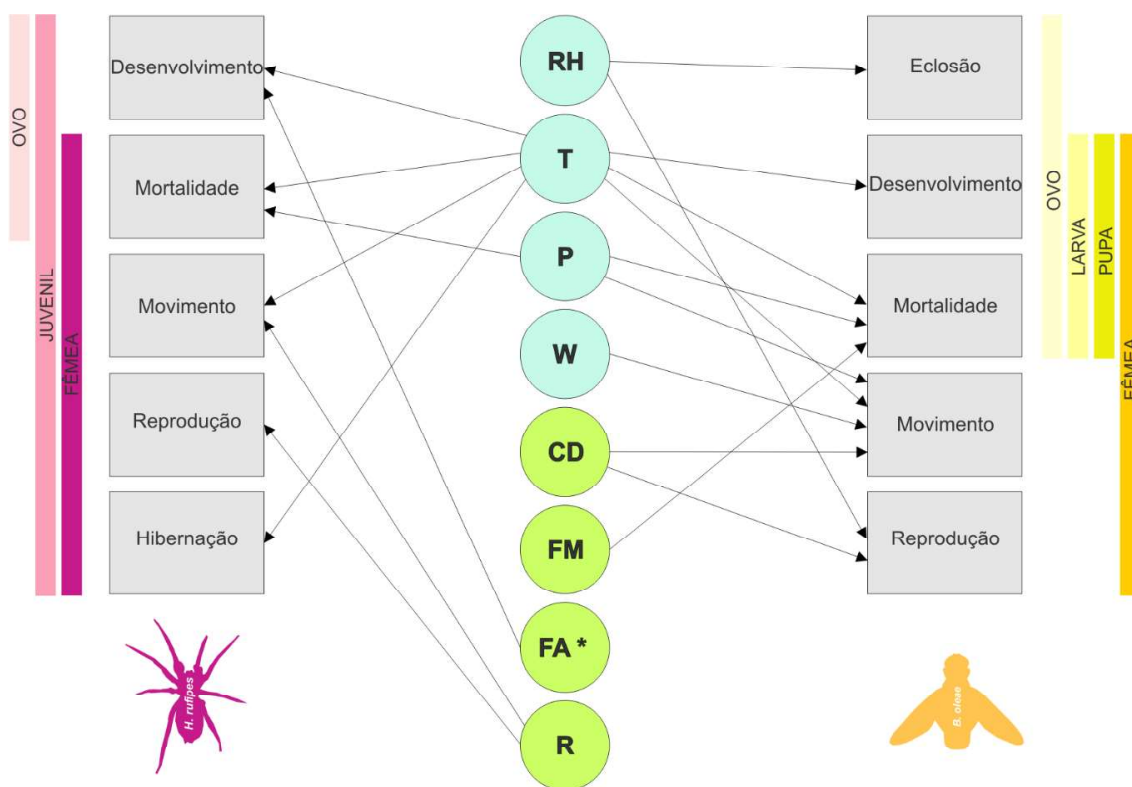


Figura 1 – Localização da área de estudo e dos sítios mencionados neste trabalho.



e é o número de moscas no estágio ovo
 I é o número de moscas no estágio larva
 p é o número de moscas no estágio pupa
 f é o número de moscas no estágio fêmea
 RH é a humidade relativa do ar
 $h(RH)$ é uma função de RH que expressa a percentagem de sucesso da eclosão dos ovos de mosca
 i é o número de aranhas no estágio ovo
 j é o número de aranhas no estágio juvenil
 f é o número de aranhas no estágio fêmea
 p é uma função que expressa a probabilidade de sobrevivência da aranha durante a muda
 * a aranha fica imóvel durante a hibernação

Figura 2 – Estádios de vida definidos no modelo conceptual da mosca-da-azeitona, *Bactrocera oleae*, e da aranha, *Haplodrassus rufipes*, e outras considerações presentes nos modelos.



RH é a humidade de relativa do ar
T é a temperatura do ar, ou do solo, ou do solo durante o crepúsculo **
P é a precipitação
W é a intensidade do vento
CD é o estágio de desenvolvimento da oliveira
FM é a gestão agrícola
FA é a disponibilidade de comida, e apenas influencia o estágio juvenil
R é a disponibilidade de refúgio
* FA apenas influencia o estágio juvenil
** a temperatura do solo durante o crepúsculo apenas é usada no modelo da aranha

Figura 3 – Funções definidas no modelo conceptual da mosca-da-azeitona, *Bactrocera oleae*, e da aranha, *Haplodrassus rufipes*, e variáveis das quais dependem.