

Vida longa à rainha. E às operárias também

Felipe Martelli¹, Natália Helena Hernandes², Camilla Valente Pires³

¹ Doutorando, Bio21 Institute, The University of Melbourne, Melbourne, Australia

² Programa de Pós-Graduação em Genética, Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, SP

³ Centro de Pesquisas René Rachou, Fundação Oswaldo Cruz, Belo Horizonte, MG

Autor para correspondência: fmartelli@student.unimelb.edu.au

Palavras-chave: abelhas, castas, alimentação, polinização, desaparecimento das abelhas

É possível imaginar como seria a nossa vida se não existissem abelhas? Se a resposta for “que pouco ou nada mudaria”, está na hora de repensar o papel desses importantes insetos.

A BIOLOGIA DAS ABELHAS

Existem mais de 20.000 espécies conhecidas de abelhas (cinco vezes mais que as aproximadamente 4.000 espécies de mamíferos), um número certamente subestimado. Estão presentes em todos os continentes com exceção da Antártica. A representante mais conhecida é a abelha *Apis mellifera*, oriunda da Europa e África, criada em larga escala para a produção de mel, cera e própolis. Geralmente nas suas colmeias vivem: uma única rainha; entre 10 a 30 mil operárias estéreis; nenhum a alguns milhares de zangões, dependendo da época do ano. Esta espécie apresenta comportamento social mais complexo, apresentando divisão de trabalho (as operárias cumprem diferentes tarefas na colônia, como limpeza, construção de favos e alimentação da rainha e das crias), diferenciação de **castas** e sobreposição de gerações.

A rainha controla as atividades da colmeia pela produção de **feromônios**. Como fêmea reprodutora, cumpre a função de originar todos os indivíduos da colônia, pondo até 2000 ovos por dia. Os ovos eclodem em larvas, que se desenvolvem em pupas e estas últimas em adultos, apresentando, portanto, metamorfose completa, ou seja, são organismos holometábolos. As rainhas virgens em seu **voou nupcial** podem acasalar-se com mais de 15 zangões de diferentes colmeias, são, portanto poliândricas, armazenando os espermatozoides em uma espermateca, órgão que garante que os gametas masculinos permaneçam vivos pelos próximos três ou quatro anos enquanto a rainha for fértil e puser ovos.

Durante épocas específicas do ano, quando serão necessários para a reprodução, os machos são produzidos. Os zangões (haploides – 16 cromossomos) são originados partenogeneticamente a partir de ovos não fecundados, ou seja, recebem apenas um conjunto de cromossomos, herdados da rainha. Os ovos que se desenvolvem em zangões são postos em **alvéolos** maiores que aqueles onde se desenvolvem as operárias, levando 24 dias para completarem o desenvolvimento até adulto. Além disso, eles não possuem ferrão, mas são maiores e com olhos e antenas mais desenvolvidos do que as operárias, caracte-

rísticas utilizadas para a localização da rainha durante o voo nupcial.

As castas de rainhas e operárias são diploides (32 cromossomos), originando-se de ovos fecundados. Recebem, portanto, um conjunto de cromossomos da rainha e um conjunto de cromossomos de um dos muitos zangões que com ela se acasalou. Como as rainhas produzem óvulos por meiose, processo que segrega os cromossomos homólogos, seus gametas têm 50% de chance de receber um determinado alelo. Os machos, por serem haploides, produzem gametas por um processo semelhante à mitose. Neste caso, como não há segregação de cromossomos homólogos, os espermatozoides gerados compartilham 100% de seus alelos. Em função disso, operárias filhas de uma mesma rainha podem compartilhar de 25% a até 75% de material genético entre si, sendo que em humanos, por exemplo, irmãos de gestações diferentes ou gêmeos não idênticos, compartilham em média 50% de seus alelos ($50\% \text{ paterno} + 50\% \text{ materno} / 2 = 50\%$), se forem filhos dos mesmos pais. No caso de abelhas, se as operárias forem filhas de zangões diferentes, compartilharão 0% de material genético paterno (considerando que os zangões não compartilhem nenhum alelo, o que acontece menos frequentemente) e, em média, 50% do material genético materno, ou seja, $(0\% + 50\%) / 2 = 25\%$; ou no caso de as operárias serem filhas de um mesmo zangão compartilharão 100% de material genético paterno e, em média, 50% do material genético materno, ou seja, $(100\% + 50\%) / 2 = 75\%$.

O desenvolvimento das castas ocorre principalmente pela alimentação diferencial durante o estágio larval. Tanto as larvas de rainhas quanto as de operárias são alimentadas, até o segundo estágio larval, apenas com **geleia real**. As larvas que, partir do terceiro estágio larval, originarão rainhas permanecem recebendo uma alimentação exclusiva com geleia real, desenvolvendo-se mais rapidamente (15 dias do ovo a adulto). As larvas que, a partir do terceiro estágio larval, são alimentadas com geleia real suplementada com pólen e mel apresentarão uma taxa de crescimento mais lento, serão mais leves e se desenvolverão em operárias (20 dias do ovo a adulto).

Castas - designação dos dois tipos morfológicos de fêmeas, que desempenham as diferentes funções sociais na colmeia: rainhas e operárias. Zangões são o terceiro tipo morfológico, mas não são uma casta.

Feromônios - substâncias químicas que influenciam o comportamento e a fisiologia das operárias.

Voo nupcial - voo em que a rainha, até então virgem, é fecundada por zangões.

Geleia real - secreção glandular produzida pelas abelhas operárias. Contem proteínas, carboidratos, lipídios, vitaminas e hormônios sexuais e de crescimento.

Alvéolos - células hexagonais feitas de cera que compõem a colmeia. São usadas para armazenar mel, pólen e também para postura de ovos pela rainha.



Peptídeos do tipo insulina - proteínas similares à insulina. Regulam diversas funções fisiológicas, como crescimento e metabolismo.

Hormônio juvenil - hormônio presente em insetos que desempenha diversas funções como regular desenvolvimento e reprodução. Em abelhas também regula o comportamento das operárias.

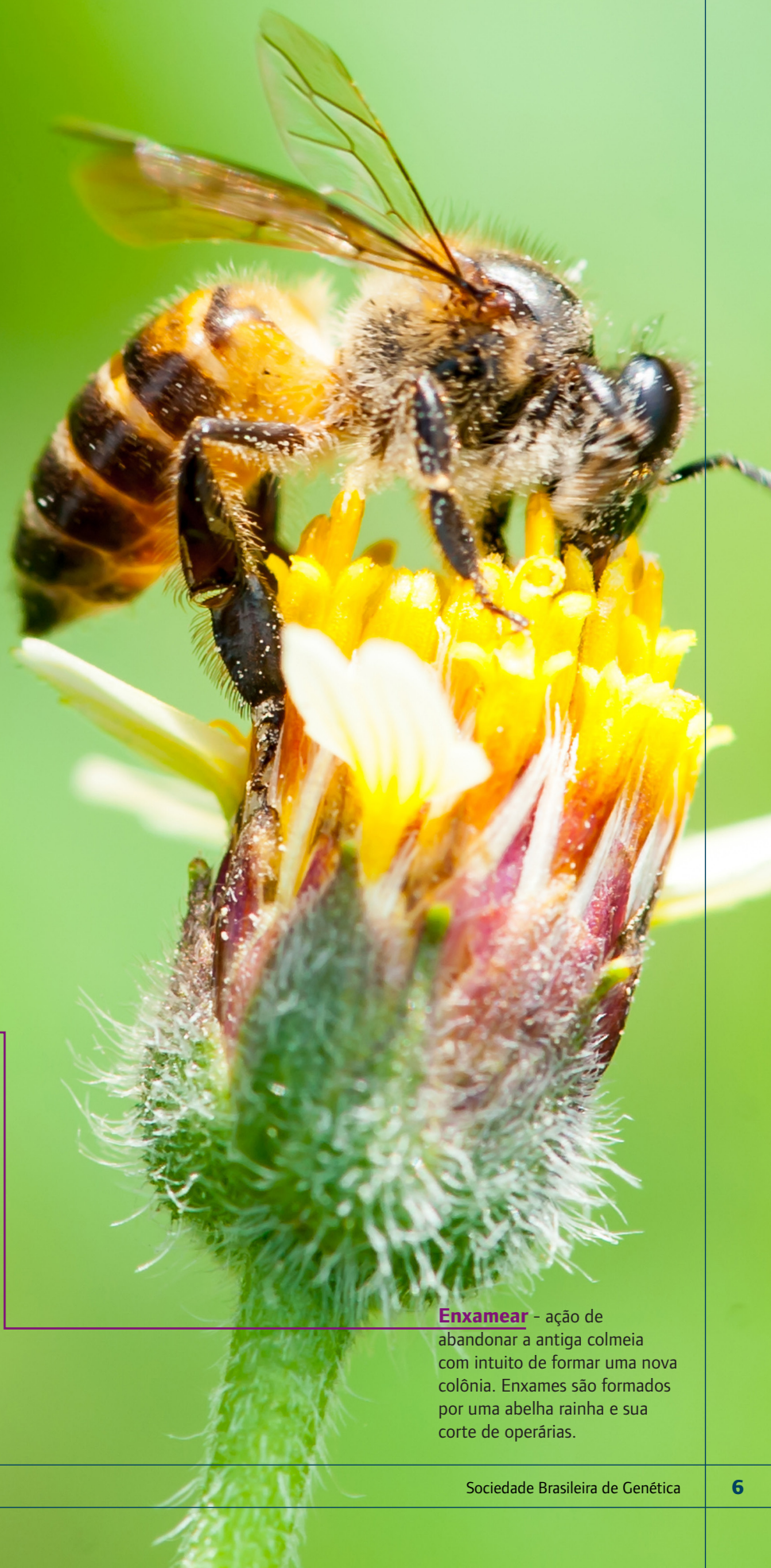
A alimentação diferencial das larvas promove padrões distintos de expressão gênica que culminam na diferenciação das castas. Uma enorme quantidade de genes está envolvida neste processo. Genes como TOR (*Target-of-rapamycin*) e os genes da via da insulina (*Insulin like peptides* – ILPs, os **peptídeos do tipo insulina**), por exemplo, são responsáveis por integrar os sinais nutricionais e coordenar o crescimento celular e corporal. Uma alimentação exclusiva com geleia real ativa a via de TOR e a via da insulina, as quais promovem aumento dos títulos de **hormônio juvenil**, que por sua vez ativam conjuntos específicos de genes que levam as larvas diploides a se desenvolver em rainhas. Nos últimos anos,

uma proteína da geleia real, Royalactin, vem sendo estudada como elemento chave na diferenciação das castas. A proteína Royalactin ativa o receptor do fator de crescimento epidermal (*Epidermal growth factor receptor* - *Egfr*), que ativa outros grupos de genes que induzem características de rainhas, tais como maior tamanho corporal e desenvolvimento dos ovários. Já em larvas alimentadas com uma mistura de geleia real suplementada com pólen e mel, as vias da insulina e TOR são menos ativas, desencadeando outras redes gênicas que fazem com que as larvas diploides se desenvolvam em operárias, inibindo, por exemplo, o desenvolvimento dos ovários e reduzindo o tamanho do corpo.

SOCIEDADE E AS ABELHAS: POLINIZAÇÃO

As abelhas são extremamente importantes para a vida no planeta, devido, principalmente, ao seu papel como polinizadoras. A polinização é um processo essencial para a reprodução sexual das plantas e manutenção da diversidade vegetal. Em torno de 85% de todas as plantas com flores, aproximadamente 210 mil espécies, são polinizadas por abelhas. Além disso, as abelhas são também muito importantes para a produção de alimentos, já que polinizam uma enorme quantidade de espécies agrícolas. As culturas agrícolas polinizadas por abelhas totalizam 10% do valor movimentado pela agricultura mundialmente, o que equivale a cerca de 212 bilhões de dólares anuais. Somente na agricultura brasileira as culturas que são polinizadas por abelhas geram 12 bilhões de dólares anuais - 30% do valor de nossa produção. Em torno de 75% dos produtos de origem vegetal que consumimos dependem das abelhas para continuar existindo. É possível entender então a catástrofe que seria se esses organismos desaparecerem do planeta.

As abelhas da família Apidae são destacadamente as mais importantes polinizadoras. Esta família inclui tribos de abelhas sociais, como as Meliponini e as Apini, sendo apenas a espécie *Apis mellifera*, responsável por polinizar ao redor de 50% das espécies agricultáveis pelo homem (<http://www.semabelhasemalimento.com.br/>). Ainda que as abelhas mais conhecidas popularmente sejam as sociais, em torno de 90% das espécies são solitárias, ou seja, não vivem em colmeias, não **enxameiam** e não produzem mel. Mas são também excelentes polinizadoras, como por exemplo, as do gênero *Xylocopa*, que polinizam o maracujá, as do gênero *Euglossa* que polinizam orquídeas e as do gênero *Centris*, que polinizam a acerola, todas pertencentes à família Apidae.



Enxamear - ação de abandonar a antiga colmeia com intuito de formar uma nova colônia. Enxames são formados por uma abelha rainha e sua corte de operárias.

E SE AS ABELHAS DESAPARECEREM?

Neonicotinoides - classe de inseticidas com estrutura química semelhante à da nicotina. Agem principalmente sobre o sistema nervoso dos insetos, causando falha nos neurônios.

Em outubro de 2006, um fenômeno aparentemente novo ocorreu na costa leste dos Estados Unidos, a perda de uma grande quantidade de colônias de abelhas. No início de 2007, apicultores europeus observaram um fenômeno semelhante na Bélgica, França, Holanda, Grécia, Itália, Portugal, Espanha, Suíça e Alemanha, com intensidade um pouco menor. Em abril de 2007, novos relatos desse fenômeno foram feitos em Taiwan. Tais perdas continuaram ao longo dos anos seguintes ao redor do mundo.

O desaparecimento das abelhas, progressivo e em escala global, recebeu o nome de Desordem do Colapso de Colônia ou CCD (do inglês *Colony Collapse Disorder*). Essa desordem é caracterizada por um desaparecimento da maioria das operárias sem que haja vestígios de seus corpos próximos à colmeia. Muitas hipóteses têm sido apontadas como responsáveis pela CCD, tais como a introdução de espécies exóticas, o uso de defensivos agrícolas, o aquecimento global, a expansão das monoculturas destruindo o habitat dos polinizadores silvestres, a presença de parasitas e a desnutrição. A CCD refere-se principalmente ao desaparecimento das abelhas nas culturas **apícolas**. Contudo, este desaparecimento também se estende a muitas espécies de abelhas nativas.

Apícolas - relativo a abelhas do gênero *Apis*.

Em 2012, no Brasil, alguns estados registraram queda de 90% na produção de mel e o abandono de colmeias chegou a 60%. Em países como a China a CCD tem levado produtores agrícolas a contratarem pessoas para fazer o trabalho de polinização, utilizando-se de ferramentas como pinças para levar o pólen de uma flor a outra e assim garantirem a produção de culturas como maçãs.

Ectoparasita - tipos de parasitas que se instalam fora do corpo do hospedeiro, como, por exemplo, os carrapatos.

A perda de polinizadores em um determinado ecossistema traz impactos terríveis e é algo difícil de ser revertido. Não se conhece o tempo preciso para a recolonização natural

por abelhas ou mesmo em que magnitude isso ocorreria. Por enquanto, não existem medidas eficientes para remediar a perda de polinizadores nativos e nem mesmo sabemos se elas seriam viáveis em longo prazo. O desaparecimento das abelhas é um problema ainda não compreendido, de âmbito global e que exige ações governamentais imediatas.

As muitas causas prováveis da CCD têm sido investigadas por grupos de cientistas em todo o mundo. Os potenciais efeitos nocivos de pesticidas estão entre as causas mais pesquisadas. Os **neonicotinóides** são a classe de defensivos agrícolas apontada como principal responsável pelo colapso.

A própria intensificação agrícola pode ser um importante fator que contribui para a CCD. A expansão de monoculturas por todo o mundo ocasiona a perda de habitat das abelhas e promove a escassez de recursos, como a variedade de pólen. O pólen é quase exclusivamente a única fonte de proteínas disponível para as abelhas, além de ser também fonte de lipídeos, amido, vitaminas e minerais. Esses nutrientes tornam o pólen um recurso indispensável para melhorar a resposta imunológica e a resistência a defensivos agrícolas além de influenciar a longevidade de abelhas recém-emergidas.

Outros fatores que podem ser causa da CCD são doenças apícolas, como a nosemose e a varroose. A nosemose é causada pelo fungo *Nosema* sp., o qual compete pelos recursos nutricionais de seu hospedeiro, causando distúrbios digestivos e suprimindo a resposta imunológica. *Varroa destructor*, agente causador da varroose e conhecido pelo nome comum de varroa, é um ácaro **ectoparasita**, que infesta as colônias de abelhas dizimando-as. Esclarecer todos os fatores envolvidos com a CCD é uma tarefa árdua. Existem ainda dúvidas em torno das causas do seu desaparecimento e a pesquisa científica é a única forma de se entender a fundo esse problema. É nesse âmbito que as ferramentas genéticas fornecem importantes contribuições.

A GENÉTICA E SUAS FERRAMENTAS PODEM AJUDAR A ENTENDER O QUE ESTÁ ACONTECENDO

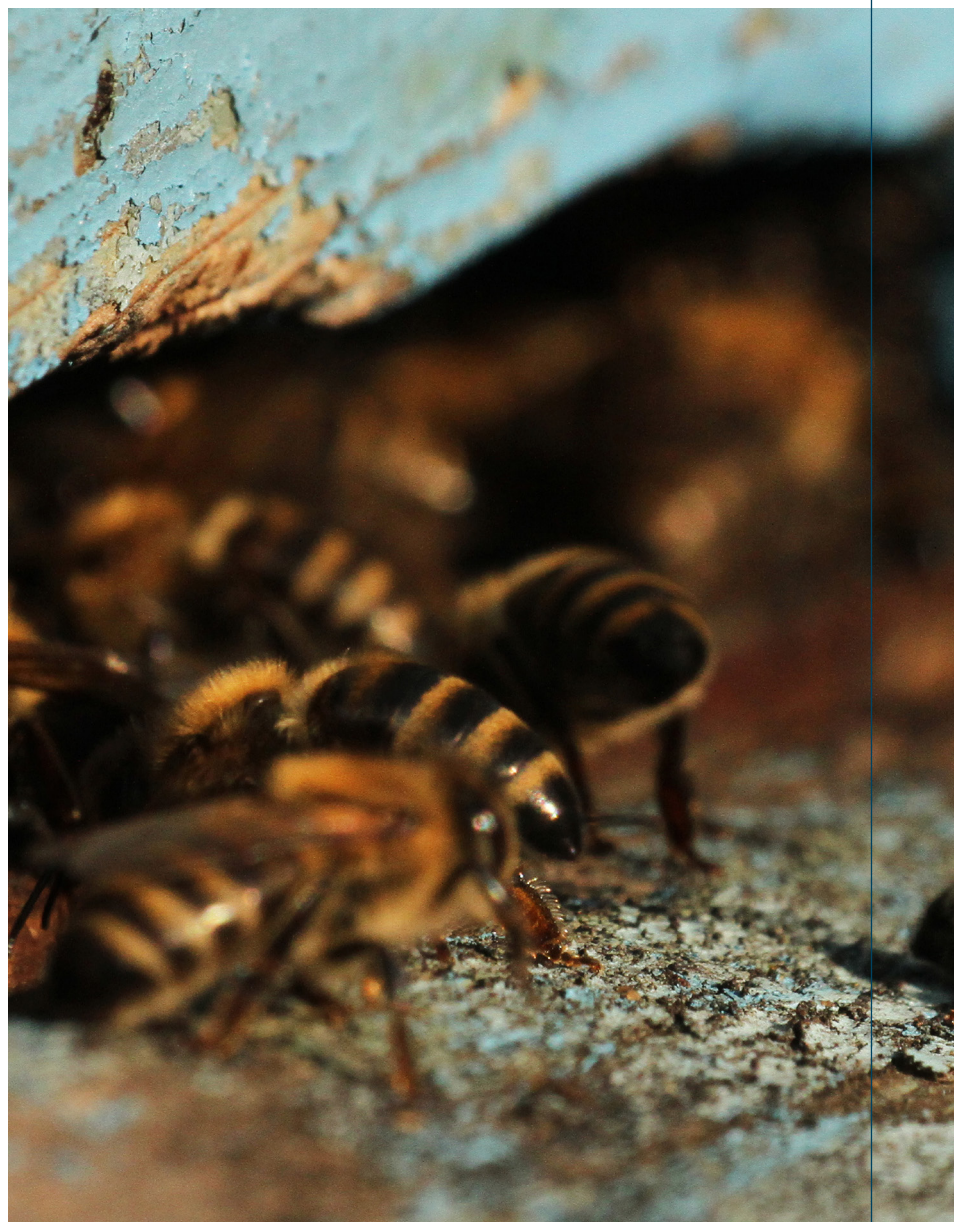
Abelhas são excelentes modelos de estudo em diversos campos das ciências. A biologia das abelhas é amplamente estudada desde a antiguidade e na última década o genoma de *A. mellifera* foi sequenciado, uma conquista imprescindível para o avanço das pesquisas genéticas com esse organismo. Abelhas são utilizadas como modelo de estudo em evolução, ecologia, neurobiologia, fisiologia e em muitos estudos em genética como nas áreas de genética da nutrição e genética do envelhecimento. Em 2008, por exemplo, um estudo publicado pela *Michael J. Fox Parkinson Foundation* mostrou que o veneno das abelhas pode auxiliar no combate aos sintomas da doença de Parkinson.

As abelhas, que há tantos anos servem como modelo para pesquisas em genética, tem agora contado com o uso das ferramentas genéticas a seu favor. Muitas pesquisas buscam desvendar como nutrição, pesticidas, patógenos e outros fatores estão causando o desaparecimento desses formidáveis insetos. Técnicas recentes como o sequenciamento de nova geração possibilitam sequenciar todo o **transcriptoma** de um indivíduo em um tempo curto. Deste modo é possível entender como todos os genes do organismo ou de órgãos específicos respondem a pesticidas, patógenos ou mesmo a dietas distintas.

Os estudos da análise da expressão gênica sondam efeitos de vários fatores de estresse sobre a saúde das abelhas. A premissa é a de que mudanças na expressão gênica forneçam indícios das causas que podem impactar negativamente a fisiologia dos organismos. Por exemplo, infecções virais em **pupas** de *A. mellifera* levam a mudanças na expressão de genes que codificam o RNAs ribossômico (RNAr), causando um grande impacto na tradução de proteínas, processo no qual os RNAr são imprescindíveis. Perfis semelhantes de expressão gênica foram também encontrados em amostras de intestino das abelhas recolhidas de colônias que apresentavam sintomas de CCD, sugerindo que, pelo menos em alguns casos, a CCD envolve infecções virais.

A exposição de abelhas jovens a pesticidas neonicotinoides altera a expressão de genes que controlam uma molécula chave para a resposta imune, conhecida por NF- κ B. Tal molécula é um fator de transcrição que participa da tradução de proteínas envolvidas na defesa imunológica. Os pesticidas parecem, portanto, tornar as abelhas imunossuprimidas, deixando-as muito mais suscetíveis a infecções virais ou por outros patógenos.

Transcriptoma - conjunto de transcritos, isto é os RNAs produzidos pelos genes que estão sendo expressos.



Pupas - estágio intermediário entre a larva e o adulto, no desenvolvimento de insetos que passam por metamorfose completa.

Os pesticidas perturbam a expressão de genes relacionados à detoxificação, como os genes da família do citocromo P450. Esta família de enzimas metaboliza uma enorme variedade de substratos e produz importan-

Plasticidade neural - capacidade de o cérebro desenvolver novas conexões entre os neurônios, permitindo que novos comportamentos sejam aprendidos.

Xenobióticos - compostos estranhos a um organismo por não serem por ele produzidos, como os inseticidas.

tes moléculas como hormônios esteroides. Os neonicotinóides causam aumento na expressão de genes do citocromo P450 ligados ao metabolismo de lipídeos e **xenobióticos**.

Os pesticidas, dessa forma, perturbam o metabolismo dos insetos, prejudicando sua fisiologia e dificultando o cumprimento de tarefas celulares importantes para sua sobrevivência, como o processamento de macromoléculas para produção de energia.

glutaciona peroxidase), genes supressores da resposta imunológica e genes ligados à **plasticidade neural**. Abelhas apresentam um aumento na demanda cognitiva, relacionada à memória e ao aprendizado, quando se tornam mais velhas, importante para as tarefas de **forrageamento** que dependem da capacidade cerebral de realizar a navegação espacial durante o voo. Entretanto, os pesticidas podem comprometer a expressão de genes ligados ao desenvolvimento de novas projeções neurais e isso reduz a capacidade cognitiva das abelhas, tornando as forrageiras inaptas para cumprir suas funções.

Em geral, os fatores cogitados como causadores da CCD parecem ser responsáveis por causar a ativação transcricional de muitas vias comuns, como vias reguladoras do metabolismo, do sistema imune e da plasticidade neural. É muito provável, portanto, que o desaparecimento em massa das abelhas esteja relacionado não a poucos genes, mas a muitas redes gênicas que, uma vez comprometidas levariam à morte dos indivíduos. Essa característica corrobora a hipótese de que a CCD possui uma causa multifatorial, centrada sobretudo nos pesticidas, infecções por patógenos e dietas pobres.

As técnicas da genética moderna têm ajudado a compreender a forma como os possíveis fatores causadores da CCD abalam a saúde das abelhas e causam seu desaparecimento. As pesquisas, contudo, ainda estão começando a compreender as causas desse preocupante fenômeno e muito mais estudos precisam ser realizados. A pesquisa incansável, a ação dos apicultores e a cobrança de medidas públicas (como melhores regulamentações para uso de pesticidas), são nossas melhores ferramentas para garantir e promover a sobrevivência desses organismos essenciais para a nossa vida.

PARA SABER MAIS

NAUG, D. Nutritional stress due to habitat loss may explain recent honeybee colony collapses. *Biological Conservation*. v. 142, p. 2369–72, 2009.

WINSTON, M. L. *A Biologia da Abelha*. Editora Magister. 2003.

<http://www.semabelhasemalimento.com.br>



Forrageamento - busca e exploração de recursos alimentares.

Alguns estudos mostram ainda como dietas desbalanceadas perturbam a expressão de genes da via da insulina, de TOR, e de genes ligados à defesa antioxidante (como SOD – superóxido dismutase; e GPx –