



ISRAEL AUGUSTO ALMEIDA GONÇALVES

**REDES MULTITROFICAS DE INTERAÇÃO PLANTA-
HOSPEDEIRO-PARASITOIDES**

**LAVRAS – MG
2023**

ISRAEL AUGUSTO ALMEIDA GONÇALVES

**REDES MULTITROFICAS DE INTERAÇÃO PLANTA-HOSPEDEIRO-
PARASITOIDES**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Ciências Biológicas, para obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Lucas Del Bianco Faria
Orientador

**LAVRAS – MG
2023**

ISRAEL AUGUSTO ALMEIDA GONÇALVES

**REDES MULTITROFICAS DE INTERAÇÃO PLANTA-HOSPEDEIRO-
PARASITOIDES**

MULTITROPHIC PLANT-HOST-PARASITOID INTERACTION NETWORKS

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Ciências Biológicas, para obtenção do título de Bacharel.

APROVADO em 8 de dezembro de 2023

Prof. Dr. Lucas Del Bianco Faria UFLA

Prof. Dr. Marcel Gustavo Hermes UFLA

Dr. Chaim José Lasmar UFLA

Prof. Dr. Lucas Del Bianco Faria
Orientador

**LAVRAS – MG
2023**

“Dedico esse trabalho aos meu pais, Jovelino e
Elisangela, que fizeram e fazem tudo por mim”

AGRADECIMENTOS

Aos meu pais, Jovelino e Elisangela, sem eles eu não seria nada. Obrigado por todo amor, atenção, conselhos e carinho.

Ao meu avô, Sebastião, que é a minha maior inspiração de ser humano que quero me tornar.

Aos meus amigos, Lucas e Enzo pelo companheirismo, lendas.

Ao meu orientador Lucas Del Bianco Faria por me mostrar coisas tão interessantes e me ajudar sempre que necessário.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio financeiro.

Muito obrigado!

RESUMO

Redes de interação são teias complexas de conexões e vínculos entre espécies em ecossistemas. Essas redes capturam interações como mutualismo e antagonismo. Destacam-se as redes multitróficas, envolvendo plantas, hospedeiros e parasitoides. As plantas são produtores, os hospedeiros se alimentam delas e os parasitoides se alimentam dos hospedeiros. Essas redes refletem dependências ecológicas e afetam comunidades e ecossistemas. O estudo utilizou redes de interação da espécie *Senegalia tenuifolia* (em anos e locais diferentes), *Brassica oleracea*, *Piptadenia gonoacantha*, *Leucaena leucocephala*, *Inga vera* e *Senna multijuga* obtidas dentro da rotina do laboratório que estou inserido. Os dados foram organizados em scripts R unificados para facilitar a análise e o cálculo de métricas. O pacote "cheddar" e o Rstudio foram utilizados para calcular as métricas e o pacote "igraph" para visualizar as redes. O estudo analisou redes de interação planta-hospedeiro-parasitoide usando 16 métricas diferentes. Incluindo número de nós, densidade de links e características como generalidade trófica e vulnerabilidade trófica. Imagens geradas ilustraram os padrões de conexões e facilitaram a comunicação dos resultados. Isso contribui para avançar o conhecimento das interações ecológicas nessas redes, fornecendo informações importantes sobre a estrutura e a dinâmica dos ecossistemas estudados.

Palavras-chave: Redes Multitróficas. Redes de Interação. Planta-Hospedeiro-Parasitoide.

ABSTRACT

Interaction networks are complex webs of connections and links between species in ecosystems. These networks capture interactions such as mutualism and antagonism. Multitrophic networks stand out, involving plants, hosts and parasitoids. Plants are producers, hosts feed on them, and parasitoids feed on hosts. These networks reflect ecological dependencies and affect communities and ecosystems. The study used interaction networks of the species *Senegalia tenuifolia* (in different years and locations), *Brassica oleracea*, *Piptadenia gonoacantha*, *Leucaena leucocephala*, *Inga vera* and *Senna multijuga* obtained within the routine of the laboratory in which I work. Data was organized into unified R scripts to facilitate analysis and metrics calculation. The "cheddar" package and Rstudio were used to calculate the metrics and the "igraph" package to visualize the networks. The study analyzed plant-host-parasitoid interaction networks using 16 different metrics. Including number of nodes, link density and characteristics such as trophic generality and trophic vulnerability. Images generated illustrated the patterns of connections and facilitated the communication of results. This contributes to advancing knowledge of ecological interactions in these networks, providing important information about the structure and dynamics of the studied ecosystems

.
Keywords: Multitrophic Networks. Interaction Networks. Plant-Host-Parasitoid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Rede de interação, <i>Senegalia tenuifolia</i> 2011.....	14
Figura 2 – Rede de interação, <i>Senegalia tenuifolia</i> 2012.....	15
Figura 3 – Rede de interação, <i>Senegalia tenuifolia</i> 2013.....	16
Figura 4 – Rede de interação, <i>Senegalia tenuifolia</i> 2014.....	17
Figura 5 – Rede de interação, <i>Senegalia tenuifolia</i> 2017.....	18
Figura 6 – Rede de interação, <i>Senegalia tenuifolia</i> 2011, 2012, 2013, 2014, 2017.	19
Figura 7 – Rede de interação, <i>Brassica oleracea</i>	20
Figura 8 – Rede de interação, <i>Piptadenia gonoacantha</i>	21
Figura 9 – Rede de interação, <i>Leucaena leucocephala</i>	22
Figura 10 – Rede de interação, <i>Inga vera</i>	23
Figura 11 – Rede de interação, <i>Senna multijuga</i>	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Métricas (Parte 1), rede de interação <i>Senegalia Tenuifolia</i>	25
Tabela 2 – Métricas (Parte 2), rede de interação <i>Senegalia Tenuifolia</i>	26
Tabela 3 – Métricas (Parte 1), redes de interação: <i>Brassica oleracea</i> , <i>Inga vera</i> , <i>Leucaena leucocephala</i> , <i>Piptadenia gonoacantha</i> , <i>Senna multijuga</i>	27
Tabela 4 – Métricas (Parte 2), redes de interação: <i>Brassica oleracea</i> , <i>Inga vera</i> , <i>Leucaena leucocephala</i> , <i>Piptadenia gonoacantha</i> , <i>Senna multijuga</i>	27

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	11
2.1 Redes de interação planta-hospedeiro-parasitoide.....	11
2.2 Cálculo de métricas.....	12
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	13
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	14
5. CONCLUSÃO.....	29
REFERÊNCIAS.....	30

1. INTRODUÇÃO

Redes de interação são complexas teias de conexões e vínculos entre espécies em um ecossistema. Essas redes capturam uma variedade de interações, como mutualismo, antagonismo e interações tróficas, que ocorrem entre diferentes organismos. As interações tróficas, por sua vez, se referem às relações de alimentação e transferência de energia que acontecem entre as espécies em um ecossistema. Essas interações são de extrema importância para o funcionamento e dinâmica dos sistemas biológicos (POCOCK et al., 2016).

Dentre essas interações, destacam-se as redes multitroficas que envolvem plantas, hospedeiros e parasitoides. Essas redes complexas representam as interações tróficas entre diferentes níveis tróficos em um ecossistema. Nesse tipo de rede, as plantas desempenham o papel de produtores primários, convertendo energia solar em matéria orgânica por meio da fotossíntese. Os hospedeiros, são organismos herbívoros que se alimentam das plantas, enquanto os parasitoides são organismos que se alimentam dos hospedeiros (TYLIANAKIS; TSCHARNTKE; LEWIS, 2007).

Neste estudo, foram utilizados dados quantitativos das redes de interação das plantas *Senegalia tenuifolia* (em anos e áreas diferentes), *Brassica oleracea*, *Piptadenia gonoacantha*, *Leucaena leucocephala*, *Inga vera* e *Senna multijuga*, para descrever e analisar as propriedades estruturais dessas redes multitroficas de interação. O objetivo desse estudo é analisar e descrever as complexas interações que ocorrem entre essas plantas, seus hospedeiros e os parasitoides desses hospedeiros. Foram identificadas as espécies envolvidas, os tipos de interações estabelecidas e as características das redes multitroficas. Além disso, foram aplicadas medidas quantitativas para avaliar a estrutura e organização das redes.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Redes de interação planta-hospedeiro-parasitoide

A interconexão entre as espécies dentro das comunidades naturais é fundamental para a estabilidade dos ecossistemas. Estas comunidades são formadas por uma diversidade de organismos que se relacionam através de uma rede complexa de interações ecológicas (POLIS;STRONG,1996).

Redes são representações abstratas de sistemas compostos por elementos individuais (nós) interligados entre si (ligações). Em uma rede de interações ecológicas, os nós comumente simbolizam as diferentes espécies, enquanto as conexões entre eles refletem as relações

existentes. As análises de redes ecológicas promoveram uma mudança de perspectiva no estudo das interações entre as espécies: de focar nas interações individuais entre pares de espécies para examinar o sistema de interações como um todo. Hoje, as redes ecológicas são empregadas como uma ferramenta para visualizar a unidade interligada da natureza (PINHEIRO, 2019).

As redes de interação multitroficas capturam as interações alimentares entre as plantas, hospedeiros e parasitoides, refletindo a complexa teia de dependências ecológicas que sustenta a vida em um ambiente específico (GURR et al., 2003). Essas interações podem ocorrer tanto de forma direta, como a herbívora dos hospedeiros nas plantas, quanto de forma indireta, quando as plantas liberam compostos químicos que atraem os parasitoides para controlar as populações de herbívoros (WÄCKERS; VAN RIJN; HEIMPEL, 2008).

2.2 Cálculo de métricas

Foi a partir da década de 1970 que trabalhos como o de May (1972) começaram a utilizar abordagens de redes para entender a complexidade das interações entre espécies e ecossistemas. O cálculo de métricas para entender e explicar características das redes ecológicas teve início na década de 1980 e continuou a se desenvolver significativamente na década de 1990. Durante esse período, houve um aumento na aplicação de métodos matemáticos e análises de redes para compreender melhor a estrutura e a dinâmica das interações ecológicas. A exploração quantitativa das redes ecológicas começou a ganhar destaque com a aplicação de conceitos de teoria de redes, especialmente na década de 1990. Métricas como conectância, foram introduzidas nessa época para tentar explicar as características dessas redes complexas (MARTINEZ, 1992).

Embora os estudos iniciais tenham começado antes, a década de 1990 foi um período crucial no desenvolvimento dessas métricas e na compreensão da importância de aplicá-las para analisar e explicar as redes de interações ecológicas. Esse período viu um aumento na publicação de trabalhos científicos que exploravam a estrutura das redes ecológicas usando métodos quantitativos e estatísticos, estabelecendo assim as bases para estudos mais aprofundados nos anos seguintes. Para realizar uma análise abrangente das redes de interação, é essencial contar com dados quantitativos que possibilitem a quantificação das interações ecológicas. Esses dados fornecem informações valiosas sobre a frequência e intensidade das interações, permitindo a aplicação de métricas e modelos que auxiliam na compreensão da estrutura e dinâmica dessas redes (JORDANO, 2016).

A abordagem quantitativa desempenha um papel fundamental na exploração das propriedades das redes de interação, proporcionando uma compreensão mais precisa das relações ecológicas (LOEHLE; LI, 1996).

3. MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo se baseou em redes de interação das espécies: *Senegalia tenuifolia*, *Brassica oleracea*, *Piptadenia gonoacantha*, *Leucaena leucocephala*, *Inga vera* e *Senna multijuga* as quais foram previamente desenvolvidas nos estudos de Faria, Maia e Nascimento (2018); Faria, Monteiro e Morales-Silva (2018); Faria, Morales-Silva e Pedroso (2021); De Oliveira *et al.* (2023); Morales-Silva *et al.* (2023). Essas redes foram obtidas com um elevado grau de sistematização e detalhamento, considerando cuidadosamente os esforços amostrais e o estabelecimento das ligações entre as espécies. Os dados das redes de interação estavam originalmente organizados em diferentes scripts de linguagem R. Com o intuito de facilitar a análise e otimizar o cálculo das métricas, esses scripts foram unificados em um único arquivo.

A análise das redes de interação foi conduzida utilizando-se ferramentas disponíveis no ambiente R Studio (TEAM R, 2023). O pacote "cheddar" (HUDSON et al., 2013) e as funções já disponíveis no próprio R Studio foram empregados para o cálculo das métricas necessárias. Além disso, o pacote "tidyverse" (KABACOFF, 2022) foi utilizado para manipular os dados e construir a matriz de adjacência, que representa as conexões entre as espécies na rede de interação.

A partir da matriz de adjacência, a análise prosseguiu com o uso do pacote "igraph" (CSARDI et al., 2006) no ambiente do R Studio para criar visualizações gráficas das redes de interação. Essas visualizações forneceram uma compreensão mais clara e intuitiva da estrutura e das conexões presentes nas redes.

As métricas calculadas incluíram medidas como o número de nós na rede (S), densidade de links (LS), número de links basais (B), número de espécies intermediárias (I) e número de espécies de topo (Top). Além disso, foram investigadas outras métricas importantes, como a razão hospedeiro/parasitoide (PredPeyR), conectância (Cnt), generalidade trófica (Gen) e vulnerabilidade trófica (Vul).

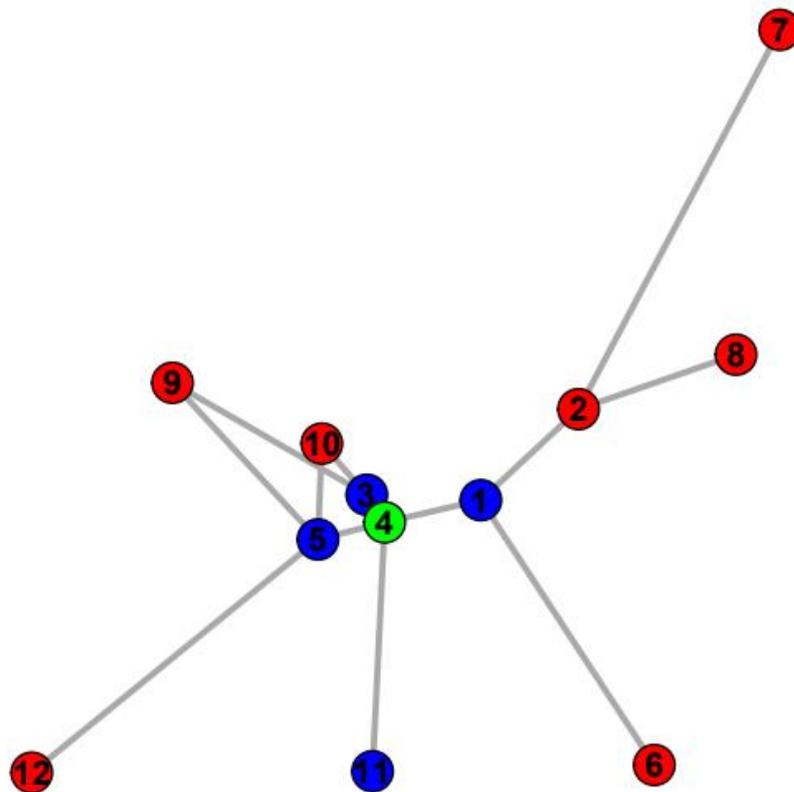
Também foram considerados aspectos relacionados à estabilidade e complexidade das redes, como o desvio padrão da generalidade trófica (GenSD), desvio padrão da vulnerabilidade trófica (VulSD) e medida de nível trófico (ShortTL). Além disso, foram analisados o desvio padrão das medidas de comprimento da rede (ChnSD), fração de onívoros na rede (FracOmn), tamanho máximo da cadeia (D) e coeficiente de agrupamento (CC).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados deste estudo forneceram uma análise detalhada das redes de interação planta-hospedeiro-parasitoide, por meio do cálculo de 16 métricas diferentes. Essas métricas foram utilizadas para avaliar características chave das redes e compreender a estrutura e dinâmica dessas interações complexas.

Imagens foram geradas para cada rede de interação estudada, visualizando a estrutura e os padrões de conexões presentes. As imagens forneceram uma representação visual das redes de interação, destacando os nós (espécies) e as arestas (interações) entre eles. Através dessas representações gráficas, foi possível observar a organização e a distribuição das interações na rede. As imagens geradas foram valiosas para ilustrar e comunicar os resultados obtidos, permitindo uma visualização direta e efetiva das redes de interação analisadas (FIGURA 1 A 11).

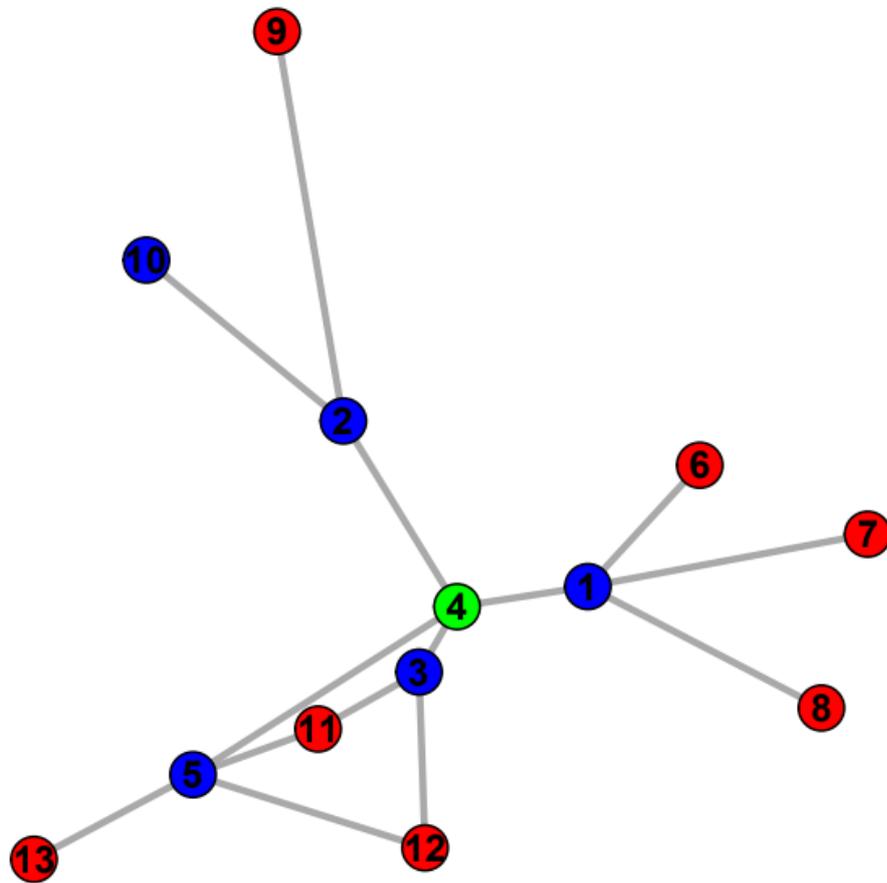
Figura 1 – Rede de interação, *Senegalia tenuifolia* 2011.



Legenda: Verde = planta, azul = hospedeiros, vermelho = parasitoides. 1 = *Allohogas vulgaris*, 2 = *Eurytoma sp1*, 3 = *Merobruchus terani*, 4 = *Senegalia tenuifolia*, 5 = *Stator maculatopygus*, 6 = *Eurytoma sp3*, 7 = *Aprostocetus sp*, 8 = *Brasema sp*, 9 = *Heterospilus sp*, 10 = *Horismenus sp*, 11 = *Lepidoptera sp*, 12 = *Eupelmus sp*.

Fonte: Do autor (2023).

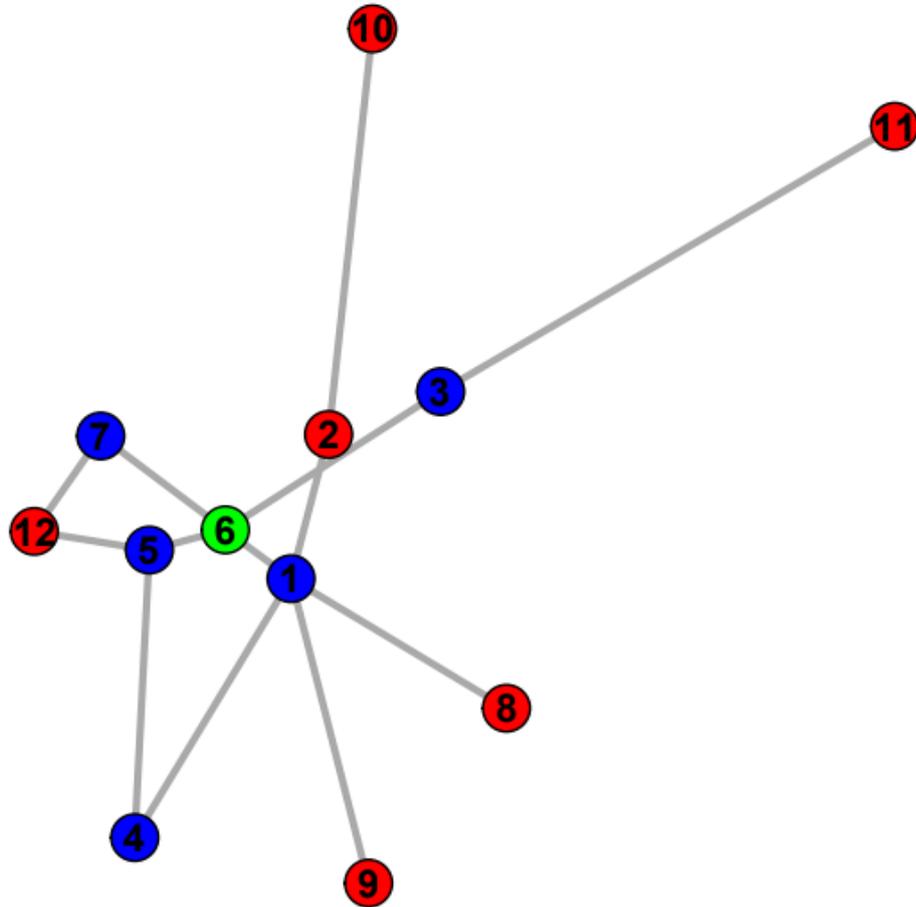
Figura 2 – Rede de interação, *Senegalia tenuifolia* 2012.



Legenda: Verde = planta, azul = hospedeiros, vermelho = parasitoides. 1 = *Allohogas vulgaris*, 2 = *Lepidoptera sp*, 3 = *Merobruchus terani*, 4 = *Senegalia tenuifolia*, 5 = *Stator maculatopygus*, 6 = *Eurytoma sp1*, 7 = *Eurytoma sp2*, 8 = *Eurytoma sp3*, 9 = *Chelonus sp*, 10 = *Gonizious sp*, 11 = *Horismenus sp*, 12 = *Paracrias sp*, 13 = *Eupelmus sp*.

Fonte: Do autor (2023).

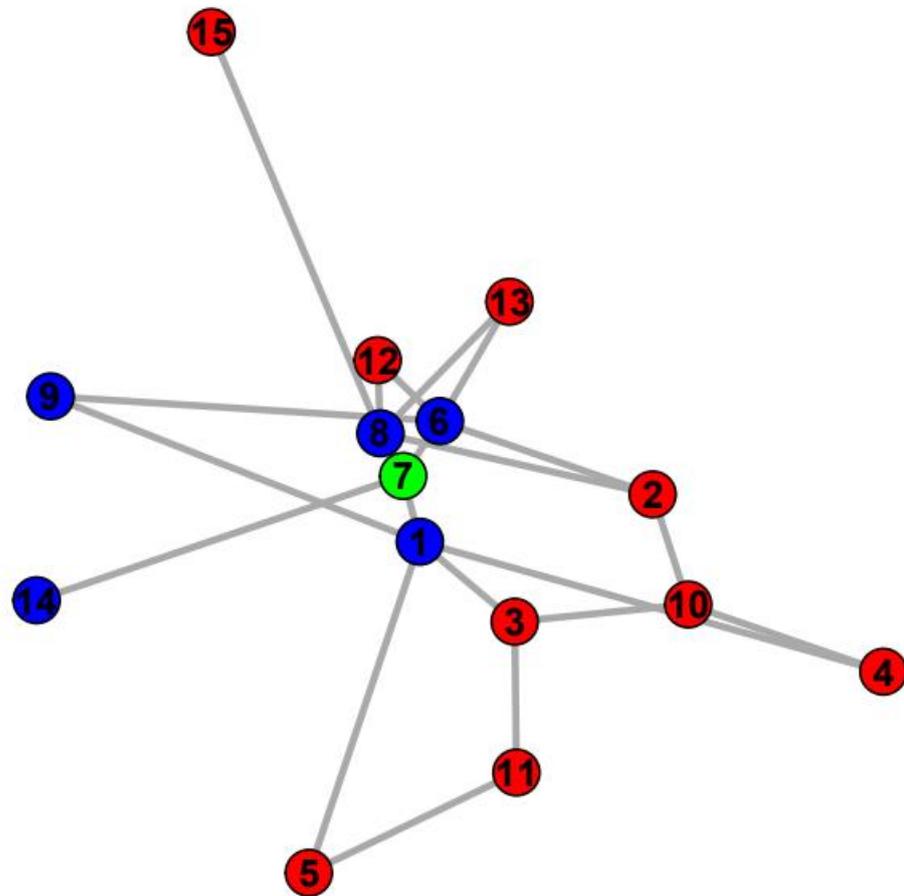
Figura 3 – Rede de interação, *Senegalia tenuifolia* 2013.



Legenda: Verde = planta, azul = hospedeiros, vermelho = parasitoides. 1 = *Allohogas vulgaris*, 2 = *Eurytoma sp1*, 3 = *Lepidoptera sp*, 4 = *Lycus sp*, 5 = *Merobruchus terani*, 6 = *Senegalia tenuifolia*, 7: *Stator maculatopygus*, 8 = *Eurytoma sp2*, 9 = *Eurytoma sp3*, 10 = *Sycophila sp*, 11 = *Chelonus sp*, 12 = *Horismenus sp*.

Fonte: Do autor (2023).

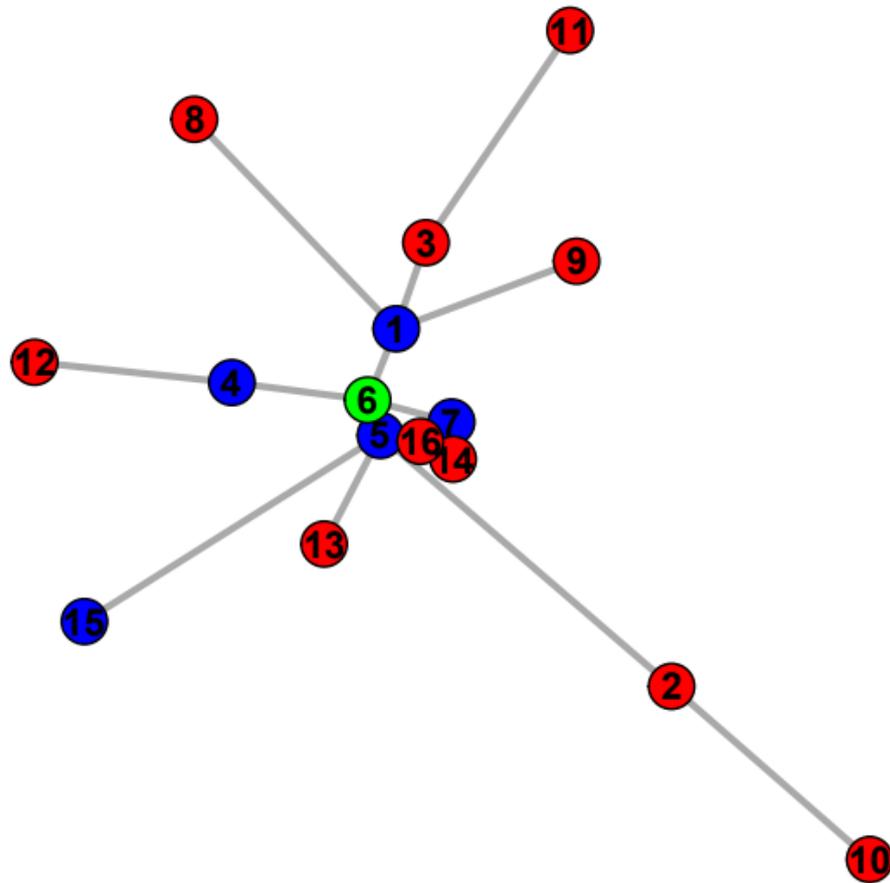
Figura 4 – Rede de interação, *Senegalia tenuifolia* 2014.



Legenda: Verde = planta, azul = hospedeiros, vermelho = parasitoides. 1 = *Allohogas vulgaris*, 2 = *Bracon sp*, 3 = *Eurytoma sp1*, 4 = *Eurytoma sp2*, 5 = *Eurytoma sp3*, 6 = *Merobruchus terani*, 7 = *Senegalia tenuifolia*, 8 = *Stator maculatopygus*, 9 = *Lycus sp*, 10 = *Brasema sp*, 11 = *Sycophila sp*, 12 = *Horismenus sp*, 13 = *Paracrias sp*, 14 = *Lepidoptera sp*, 15 = *Eupelmus sp*.

Fonte: Do autor (2023).

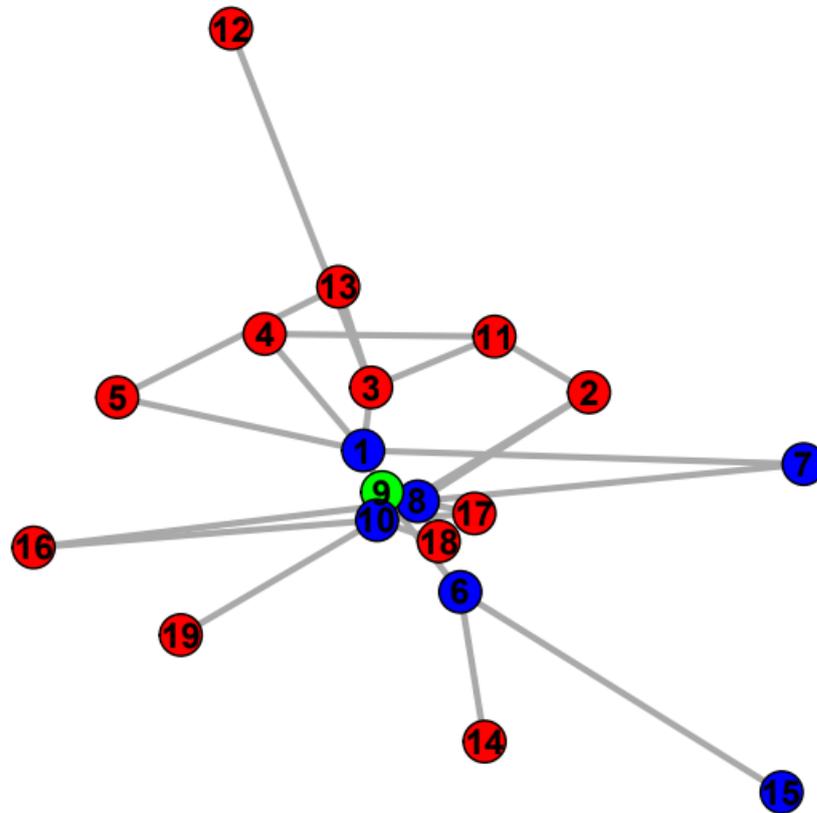
Figura 5 – Rede de interação, *Senegalia tenuifolia* 2017.



Legenda: Verde = planta, azul = hospedeiros, vermelho = parasitoides. 1 = *Allohogas vulgaris*, 2 = *Bracon* sp, 3 = *Eurytoma* sp1, 4 = *Lepidoptera* sp, 5 = *Merobruchus terani*, 6: *Senegalia tenuifolia*, 7 = *Stator maculatopygus*, 8 = *Eurytoma* sp2, 9 = *Eurytoma* sp3, 10: *Brasema* sp, 11 = *Sycophila* sp, 12 = *Chelonus* sp, 13 = *Heterospilus* sp, 14 = *Horismenus* sp, 15 = *Lycrus* sp, 16 = *Paracrias* sp.

Fonte: Do autor (2023).

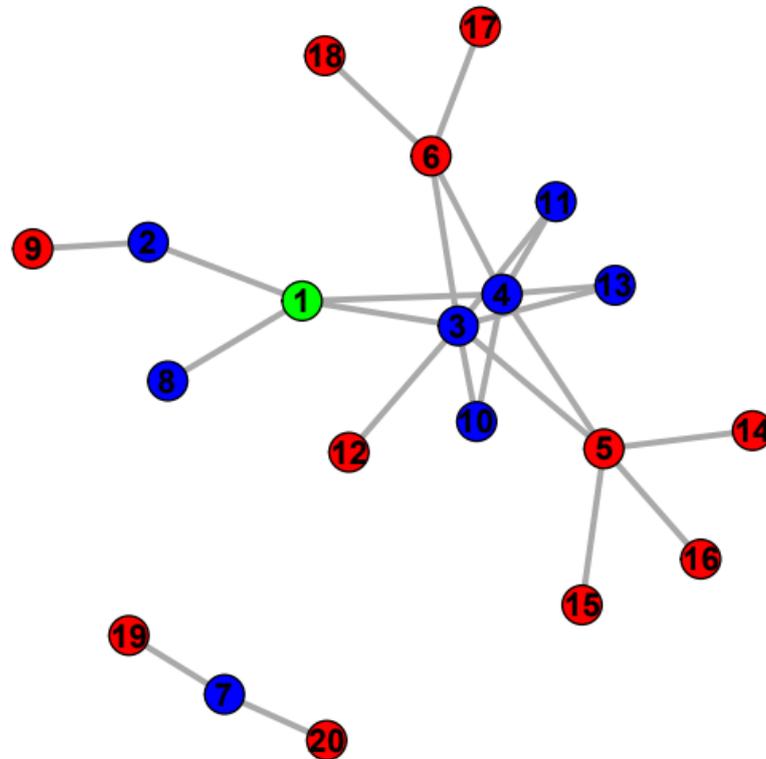
Figura 6 – Rede de interação, *Senegalia tenuifolia* 2011, 2012, 2013, 2014, 2017.



Legenda: Verde = planta, azul = hospedeiros, vermelho = parasitoides. 1 = *Allohogas vulgaris*, 2 = *Bracon sp*, 3 = *Eurytoma sp1*, 4 = *Eurytoma sp2*, 5 = *Eurytoma sp3*, 6 = *Lepidoptera sp*, 7 = *Lycrus sp*, 8 = *Merobruchus terani*, 9 = *Senegalia tenuifolia*, 10 = *Stator maculatopygus*, 11 = *Brasema sp*, 12 = *Aprostocetus sp*, 13 = *Sycophila sp*, 14 = *Chelonus_sp*, 15 = *Gonizious sp*, 16 = *Heterospilus sp*, 17 = *Horismenus sp*, 18 = *Paracrias sp*, 19 = *Eupelmus sp*.

Fonte: Do autor (2023).

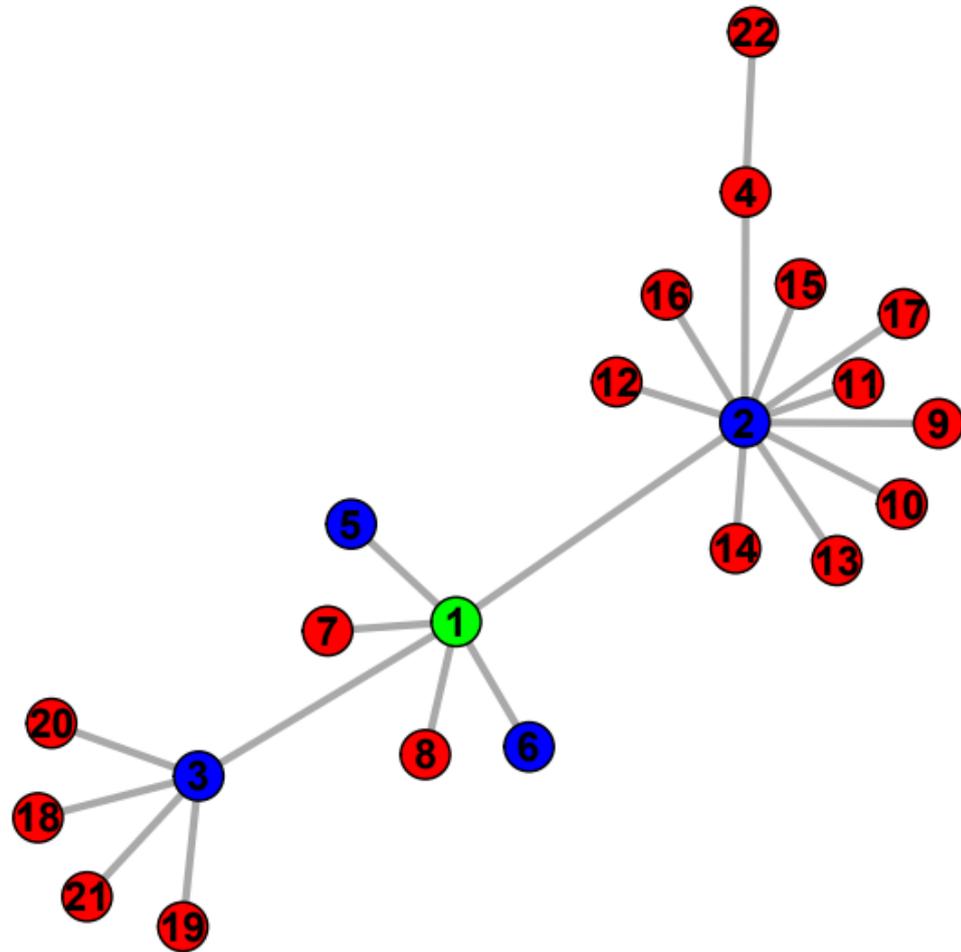
Figura 7 – Rede de interação, *Brassica oleracea*.



Legenda: Verde = planta, azul = hospedeiros, vermelho = parasitoides. 1 = *Brassica oleracea*, 2 = *Plutella xylostella*, 3 = *Brevicoryne brassicae*, 4 = *Myzus persicae*, 5 = *Diaeretiella rapae*, 6 = *Aphelinus asychis*, 7 = *Allograpta exótica*, 8 = *Trichoplusia ni*, 9 = *Oomyzus sokolowskii*, 10 = *Hippodamia convergens*, 11 = *Allograpta exotica*, 12 = *Lysiphlebus testaceipes*, 13 = *Cycloneda sanguinea*, 14 = *Syrphophagus aphidivorus*, 15 = *Phaenoglyphis fuscicornis*, 16 = *Alloxysta consobrina*, 17 = *Pachyneuron aphidis*, 18 = *Syrphophagus aphidivorus*, 19 = *Diplazon laetatorius*, 20 = *Pachyneuron sp.*

Fonte: do autor (2023).

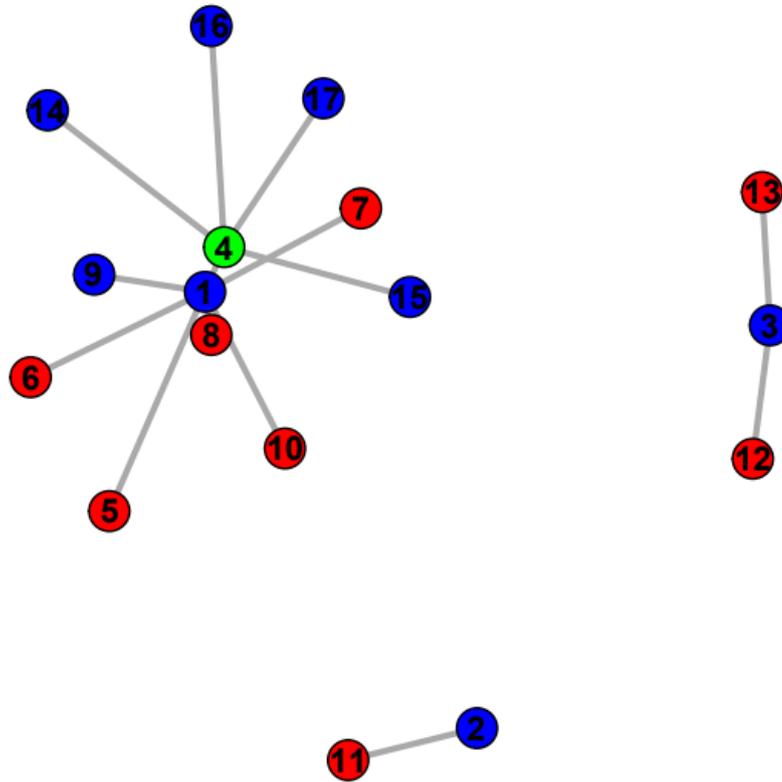
Figura 8 – Rede de interação, *Piptadenia gonoacantha*



Legenda: Verde = planta, azul = hospedeiros, vermelho = parasitoides. 1 = *Piptadenia gonoacantha*, 2 = *Acanthoscelides clitellarius*, 3 = *Lepidoptera*, 4 = *Eurytoma sp1*, 5 = *Dermestidae*, 6 = *Diptera*, 7 = *Allorhogas sp1*, 8 = *Chalcidoidea sp1*, 9 = *Eurydinoteloides sp1*, 10 = *Eurydinoteloides sp2*, 11 = *Eurydinoteloides sp3*, 12 = *Horismenus sp1*, 13 = *Horismenus sp2*, 14 = *Eupelmus sp1*, 15 = *Eurytoma sp2*, 16 = *Eurytoma sp3*, 17 = *Heterospilus sp1*, 18 = *Bracon sp1*, 19 = *Bracon sp2*, 20 = *Chelonus sp1*, 21 = *Phanerotoma sp1*, 22 = *Sycophila*.

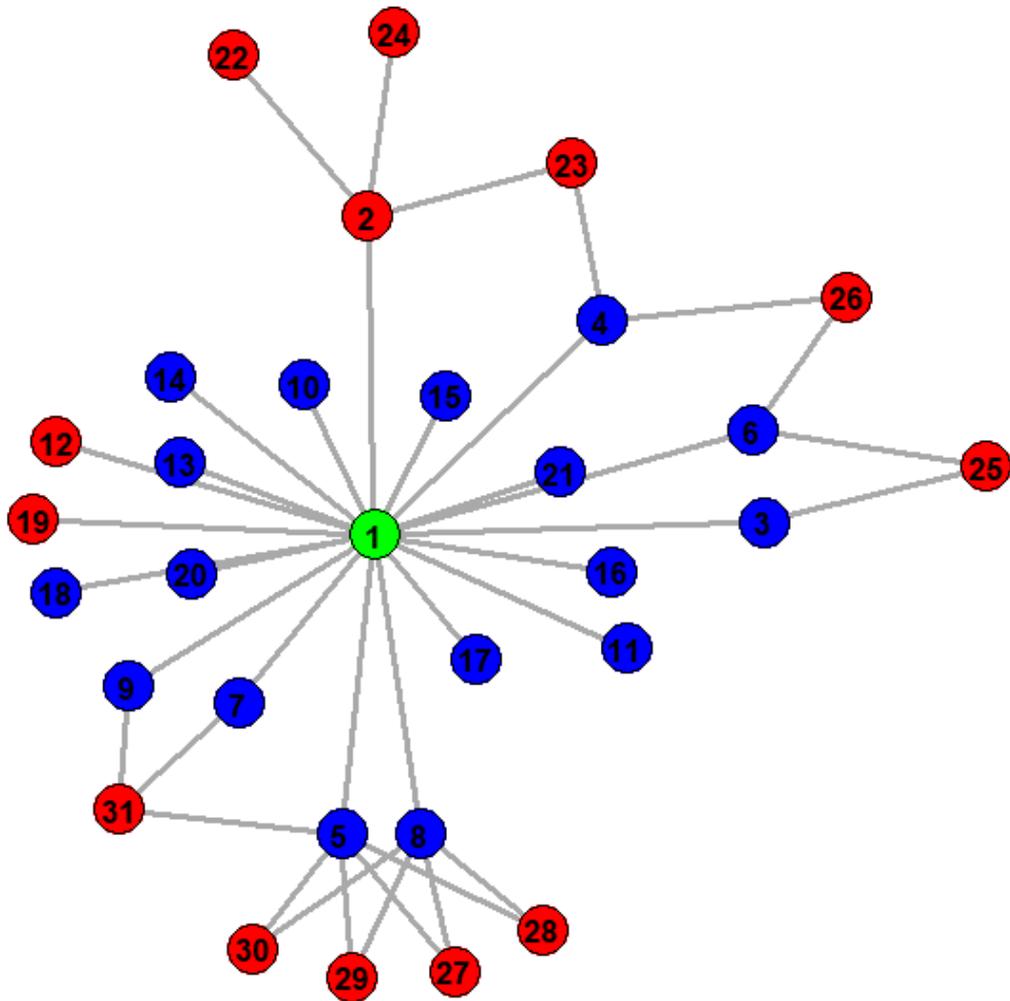
Fonte: Do autor (2023).

Figura 9 – Rede de interação, *Leucaena leucocephala*.



Legenda: Verde = planta, azul = hospedeiros, vermelho = parasitoides. 1 = *Acanthoscelides macrophthalmus*, 2 = *hypothenemus sp1*, 3 = *Lepidoptera*, 4 = *Leucaena leucocephala*, 5 = *Eupelmus eupelmus pulchriceps*, 6 = *Eurytoma sp1*, 7 = *Heterospilus sp1*, 8 = *Paracrias pluteus*, 9 = *Stenocorse bruchivora*, 10 = *Urosigalphus sp1*, 11 = *Perilampus sp1*, 12 = *Chelonus sp1*, 13 = *Phanerotoma sp1*, 14 = *Anobiidae*, 15 = *miriadae sp1*, 16 = *phlaeothripidae sp1*, 17 = *Silvanidae*.

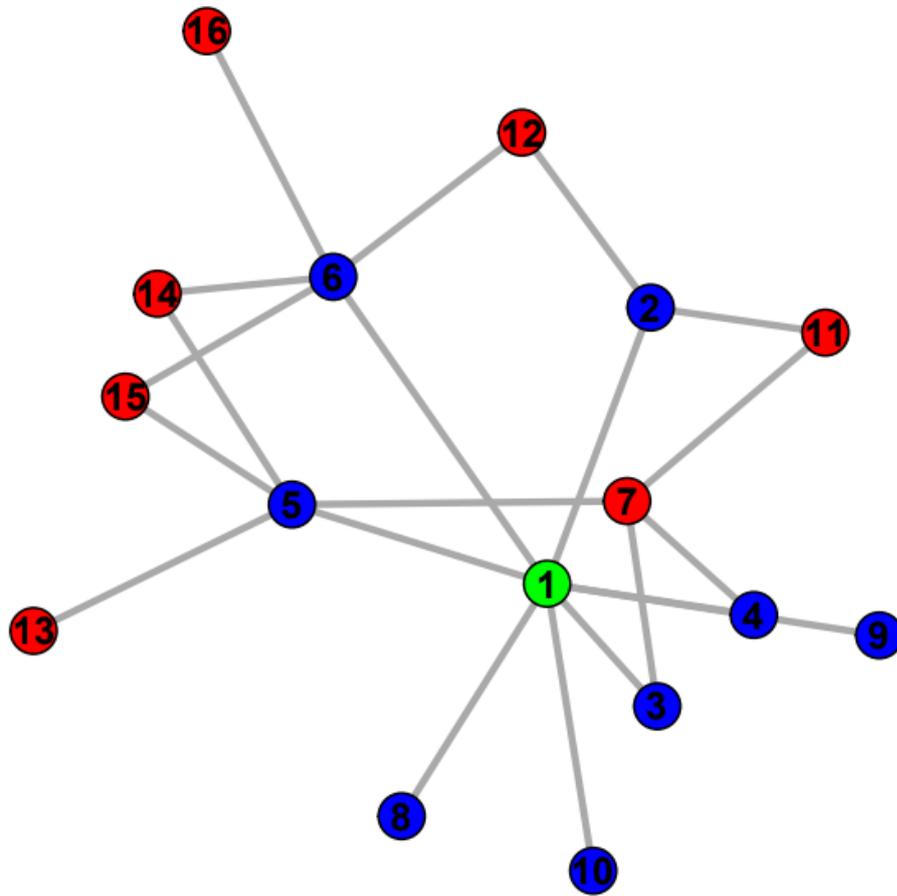
Fonte: Do autor (2023).

Figura 10 – Rede de interação, *Inga vera*.

Legenda: Verde = planta, azul = hospedeiros, vermelho = parasitoides. 1 = *I. vera*, 2 = *Allorhogas sp.1*, 3 = *Araecerus fasciculatus*, 4 = *Cecidomyiidae sp.1*, 5 = *Cosmopterigidae sp.1*, 6 = *Curculionidae sp.1*, 7 = *Lonchaeidae sp.1*, 8 = *Tortricidae sp.1*, 9 = *Zaprionus indianus*, 10 = *Anastrepha distincta*, 11 = *Apion sp.1*, 12 = *Eupelmus(Eupelmus) sp.2*, 13 = *Hypothenemus seriatus*, 14 = *Lasioderma serricorne*, 15 = *Membracidae sp.1*, 16 = *Miridae sp.1*, 17 = *Nitidulidae sp.1*, 18 = *Nitidulidae sp.2*, 19 = *Prodecatoma sp.1*, 20 = *Sennius sp.1*, 21 = *Silvanidae sp.1*, 22 = *Phylloxeroxenus sp.1*, 23 = *Sycophila sp.2*, 24 = *Sycophila sp.1*, 25 = *Encyrtidae sp.1*, 26 = *Eupelmus (Eupelmus) sp.3*, 27 = *Apanteles sp.1*, 28 = *Chelonus (Chelonus) sp.1*, 29 = *Chelonus (Microchelonus) sp.1*, 30 = *Trichogrammatidae sp.1*, 31 = *Ichneumonidae sp.2*.

Fonte: Do autor (2023).

Figura 11 – Rede de interação, *Senna multijuga*.



Legenda: Verde = planta, azul = hospedeiros, vermelho = parasitoides. 1 = *S. multijuga*, 2 = *Bruchinae sp.1*, 3 = *Bruchinae sp.2*, 4 = *Sennius bondari*, 5 = *Sennius nappi*, 6 = *Sennius puncticolis*, 7 = *Phylloxeroxenus sp.1*, 8 = *Cecidomyiidae sp.1*, 9 = *Lasioderma serricone*, 10 = *Sennius crudelis*, 11 = *Aprostocetus (Aprostocetus) sp.1*, 12 = *Eurydinoteloides sp.1*, 13 = *Eupelmus (Eupelmus) sp.1*, 14 = *Eurytoma sp.2*, 15 = *Heterospilus sp.2*, 16 = *Horismenus sp.1*.

Fonte: Do autor (2023).

Nas Tabelas 1 e 2, temos os valores das métricas calculadas para a rede de interação da planta *Senegalia Tenuifolia* em todos os anos e locais.

Tabela 1 – Métricas (Parte 1), rede de interação *Senegalia tenuifolia*.

ANO	LOCAL	S	LS	B	CNT	I	TOP	PREDPREYR	D
2011-17		19	1,421053	0,052632	0,074792	0,473684	0,473684	1,8	4
2011	T	12	1,083333	0,083333	0,090278	0,333333	0,583333	2,2	3
2011	A	11	1	0,090909	0,090909	0,363636	0,545455	2	3
2011	B	9	1	0,111111	0,111111	0,444444	0,444444	1,6	3
2011	C	7	1	0,142857	0,142857	0,428571	0,428571	1,5	2
2012	T	13	1,076923	0,076923	0,08284	0,307692	0,615385	2,4	2
2012	A	11	1	0,090909	0,090909	0,363636	0,545455	2	2
2012	B	8	1,125	0,125	0,140625	0,375	0,5	1,75	2
2012	C	9	0,888889	0,111111	0,098765	0,444444	0,444444	1,6	2
2013	T	12	1,083333	0,083333	0,090278	0,5	0,416667	1,571429	4
2013	A	11	1	0,181818	0,090909	0,363636	0,454545	1,5	3
2013	B	6	1	0,166667	0,166667	0,5	0,333333	1,25	2
2013	C	8	1	0,125	0,125	0,375	0,5	1,75	2
2014	T	15	1,4	0,066667	0,093333	0,466667	0,466667	1,75	3
2014	A	14	1,214286	0,071429	0,086735	0,428571	0,5	1,857143	3
2014	B	11	1,090909	0,090909	0,099174	0,545455	0,363636	1,428571	3
2014	C	12	1,083333	0,083333	0,090278	0,416667	0,5	1,833333	3
2017	T	16	1,0625	0,0625	0,066406	0,375	0,5625	2,142857	3
2017	A	15	1,066667	0,066667	0,071111	0,333333	0,6	2,333333	3
2017	B	8	1,125	0,125	0,140625	0,375	0,5	1,75	2
2017	C	7	1,142857	0,142857	0,163265	0,428571	0,428571	1,5	2

S = número de nós na rede, LS = densidade de links, B = número de links basais, Cnt = Conectância, I = número de espécies intermediárias, Top = número de espécies de topo, PredPeyR = razão hospedeiro/parasitoide, D = tamanho máximo da cadeia, Local “T” = Rede total com todas áreas.

Fonte: Do autor (2023).

Notamos que, para a métrica, número de nós na rede (S) a rede que teve o maior valor foi a da *Inga vera* (31) e a menor foi a da *Senegalia tenuifolia* no ano de 2013 na área “B” (6). Para a métrica densidade de links (LS) a rede de interação que teve o maior valor foi a da *Senegalia tenuifolia* com todos os anos (1.4210526) e a menor foi a da *Leucena Leucocephala* (0.8235294). No caso da métrica, número de links basais (B) a rede de interação que teve o maior valor foi a *Senegalia tenuifolia* no ano de 2013 na área “A” (0.18181818) e a rede que possui o menor valor foi a do *Inga vera* (0.03225806). Já para a métrica conectância (Cnt) a rede de interação que tem o maior valor é a da *Senegalia tenuifolia* do ano 2013 na área “B” (0.16666667) e quem teve o menor valor foi a rede da planta *Inga vera* (0.04058273). Para a métrica de número de espécies intermediárias (I) a rede que teve o maior valor foi a da *Senegalia tenuifolia* do ano 2014 na área “B” (0.54545455) e que teve o menor valor foi a da *Leucena Leucocephala* (0.05882353). A métrica de número de espécies de topo (Top) teve o seu maior valor na rede de interação da planta

Piptadenia gonoacantha (0.8181818) e o seu menor valor na rede *Senegalia tenuifolia* do ano 2013 na área “B” (0.3333333).

Tabela 2 – Métricas (Parte 2), rede de interação *Senegalia Tenuifolia*.

YEAR	LOCATION	CC	GEN	GENSD	VUL	VULSD	SHORTTL	CHNSD	FRACOMN
2011-17		0	1,5	0,487303	2,7	1,291526	2,842105	1,195229	0,210526
2011	T	0	1,181818	0,475319	2,6	1,332347	2,666667	0,600925	0
2011	A	0	1,1	0,447214	2,2	1,341641	2,636364	0,690066	0
2011	B	0	1,125	0,5	1,8	1,322876	2,444444	0,707107	0
2011	C	0	1,166667	0,57735	1,75	1,154701	2,285714	0	0
2012	T	0	1,166667	0,458295	2,8	1,390872	2,538462	0	0
2012	A	0	1,1	0,447214	2,2	1,414214	2,454545	0	0
2012	B	0	1,285714	0,569662	2,25	1,107932	2,375	0	0
2012	C	0	1	0,375	1,6	1,427957	2,333333	0	0
2013	T	0	1,181818	0,475319	1,857143	1,210497	2,583333	1,166667	0
2013	A	0	1,222222	0,632456	1,833333	1,341641	2,363636	0,600925	0
2013	B	0	1,2	0,632456	1,5	1,095445	2,166667	0	0
2013	C	0	1,142857	0,534522	2	1,414214	2,25	0,447214	0
2014	T	0	1,5	0,526277	2,625	1,231274	2,733333	0,633324	0
2014	A	0	1,307692	0,575889	2,428571	1,258456	2,714286	0,6742	0
2014	B	0	1,2	0,494413	1,714286	0,957427	2,727273	0,547723	0
2014	C	0	1,181818	0,475319	2,166667	1,332347	2,583333	0,64087	0
2017	T	0	1,133333	0,416499	2,428571	1,516385	2,75	0,40452	0
2017	A	0	1,142857	0,429129	2,666667	1,563393	2,733333	0,53936	0
2017	B	0	1,285714	0,569662	2,25	1,295767	2,25	0,408248	0
2017	C	0	1,333333	0,603807	2	1,063113	2,285714	0	0

CC = coeficiente de agrupamento, Gen = generalidade trófica, GenSD = desvio padrão da generalidade trófica, Vul = vulnerabilidade trófica, VulSD = desvio padrão da vulnerabilidade trófica, ShortTL = medida de nível trófico, ChnSD = desvio padrão das medidas de cumprimento da rede, FracOmn = fração de onívoros, Local “T” = Rede total com todas áreas.

Fonte: Do autor (2023).

Nas tabelas 3 e 4, temos os valores das métricas calculadas para as redes de interação das plantas: *Brassica oleracea*, *Inga vera*, *Leucaena leucocephala*, *Piptadenia gonoacantha*, *Senna multijuga*.

Tabela 3 – Métricas (Parte 1), redes de interação: *Brassica oleracea*, *Inga vera*, *Leucaena leucocephala*, *Piptadenia gonoacantha*, *Senna multijuga*.

PLANTAS	S	LS	B	I	Top	Cnt	PredpreyR	D
<i>Brassica oleracea</i>	20	1,15	0,1	0,25	0,65	0,0575	2,571429	3
<i>Inga vera</i>	31	1,258065	0,032258	0,258065	0,709677	0,040583	3,333333	2
<i>Leucaena leucocephala</i>	17	0,823529	0,176471	0,058824	0,764706	0,048443	3,5	2
<i>Piptadenia gonoacantha</i>	22	0,954545	0,045455	0,136364	0,818182	0,043388	5,25	3
<i>Senna multijuga</i>	16	1,3125	0,0625	0,375	0,5625	0,082031	2,142857	2

S = número de nós na rede, LS = densidade de links, B= número de links basais, Cnt = conectância, I = número de espécies intermediárias, Top = número de espécies de topo, PredPeyR = razão hospedeiro/parasitoide, D = tamanho máximo da cadeia.

Fonte: Do autor (2023).

Na métrica de razão hospedeiro/parasitoide (PredpreyR) a rede que teve o maior valor foi a da *Piptadenia gonoacantha* (5.250000) e a que teve menor valor foi a rede da *Senegalia tenuifolia* do ano 2013 na área “B” (1.250000). Para a métrica, tamanho máximo da cadeia (D), notamos que a rede de interação que possui o maior valor é a da *Senegalia tenuifolia* com todos os anos e a *Senegalia tenuifolia* do ano 2013 com o valor de 4, a rede que possui o menor valor é a *Senegalia tenuifolia* no ano de 2013 na área “B”, *Senegalia tenuifolia* no ano de 2011 na área “C”, *Senegalia tenuifolia* no ano de 2017 na área “C”, *Senegalia tenuifolia* no ano de 2012 na área “C”, *Senegalia tenuifolia* no ano de 2013 na área “C”, *Senegalia tenuifolia* no ano de 2012 na área “B”, *Senegalia tenuifolia* no ano de 2017 na área “B”, *Senegalia tenuifolia* no ano de 2013 na área “A”, *Senna multijuga*, *Senegalia tenuifolia* no ano de 2012, *Inga vera* e *Leucaena leucocephala*, todas com valores iguais a 2.

Tabela 4 – Métricas (Parte 2), redes de interação: *Brassica oleracea*, *Inga vera*, *Leucaena leucocephala*, *Piptadenia gonoacantha*, *Senna multijuga*.

PLANTAS	CC	Gen	GenSD	Vul	VulSD	ShortTL	ChnSD	FracOmn
<i>Brassica oleracea</i>	0	1,277778	0,510559	3,285714	1,651692	2,75	0,730297	0
<i>Inga vera</i>	0	1,3	0,457437	4,333333	2,945446	2,290323	0,495138	0
<i>Leucaena leucocephala</i>	0	1	0,477157	3,5	2,240484	2,176471	0,518875	0
<i>Piptadenia gonoacantha</i>	0	1	0,223353	5,25	2,636	2,681818	0,514496	0
<i>Senna multijuga</i>	0	1,4	0,536499	3	1,708633	2,375	0,654654	0,0625

CC = coeficiente de agrupamento, Gen = generalidade trófica, GenSD = desvio padrão da generalidade trófica, Vul = vulnerabilidade trófica, VulSD = desvio padrão da vulnerabilidade trófica, ShortTL = medida de nível trófico, ChnSD = desvio padrão das medidas de comprimento da rede, FracOmn = fração de onívoros.

Fonte: Do autor (2023).

Além disso, também observamos que para a métrica de coeficiente de agrupamento (CC) o valor foi de zero para todas as redes. Para a métrica de generalidade trófica (Gen) notamos que a rede que possui o maior valor é a da planta *Senegalia tenuifolia* no ano de 2014 e na junção de

todos os anos com o valor de 1.500000, e a com menor valor foi encontrada em duas redes, *Leucena Leucocephala*, *Piptadenia gonoacantha* e *Senegalia tenuifolia* no ano de 2012 na área “C” com o valor de 1. No caso da métrica de desvio padrão da generalidade trófica (GenSD) notamos que a rede de interação da planta *Senegalia tenuifolia* no ano de 2013 na área “A” e *Senegalia tenuifolia* no ano de 2013 na área “B” possui o maior valor de 0.6324555 e menor valor foi encontrado na rede da *Piptadenia gonoacantha* (0.2233531). Para a vulnerabilidade trófica (Vul), o maior valor foi encontrado na rede da planta *Piptadenia gonoacantha* (5.250000) e o menor valor foi encontrado na rede da *Senegalia tenuifolia* do ano de 2013 na área “B” (1.500000). Já para a métrica de desvio padrão da vulnerabilidade trófica (VulSD) notamos que a rede de interação que possui o maior valor era a da *Inga vera* (2.9454460) e a de menor valor era a da *Senegalia tenuifolia* do ano de 2014 na área “B” (0.9574271). A métrica de medida de nível trófico (ShortTL) teve o seu maior valor na rede da planta *Senegalia tenuifolia* de todos os anos juntos (2.842105), e teve o seu menor valor na rede da *Senegalia tenuifolia* no ano de 2013 na área “B” (2.166667). Para a métrica de desvio padrão das medidas de comprimento da rede (ChnSD), notamos que a rede com o maior valor foi a da *Senegalia tenuifolia* de todos os anos juntos (1.1952286) e a de menor valor foi a da *Senegalia tenuifolia* no ano de 2013 na área “B”, *Senegalia tenuifolia* no ano de 2017 na área “C”, *Senegalia tenuifolia* no ano de 2011 na área “C”, *Senegalia tenuifolia* no ano de 2012 na área “C”, *Senegalia tenuifolia* no ano de 2012 na área “B”, *Senegalia tenuifolia* no ano de 2013 na área “A” e *Senegalia tenuifolia* no ano de 2012 todas com o valor de 0. No caso da métrica de fração de onívoros na rede (FracOmn), notamos que a rede com o maior valor foi a da *Senegalia tenuifolia* de todos os anos (0.2105263) e somente uma outra rede teve um valor diferente de 0 que foi a da *Senna multijuga* (0.0625000).

Como foram calculadas várias métricas, dei enfoque em duas específicas, muito importantes para redes, a conectância e a densidade de links. Conectância, é uma métrica essencial para avaliar a complexidade das redes de interação (BANAŠEK-RICHTER et al., 2009; ESTRADA, 2007). Ela representa a proporção de conexões presentes em uma rede em comparação com o máximo possível de interações (DUNNE et al., 2002). Nesse trabalho, notamos discrepâncias nos valores de conectância entre as diversas redes que examinamos. Essas variações indicam os diferentes níveis de complexidade presentes em cada uma delas. Especialmente, destacamos a rede mais complexa encontrada, associada à planta *Senegalia tenuifolia* no ano de 2013 na área “B”, enquanto a rede menos complexa foi a encontrada na rede da planta *Inga vera*. É conhecido que redes mais conectadas têm uma maior capacidade de resistir à perda de espécies (DUNNE et al., 2002).

A densidade de links, é o número de ligações tróficas por espécie, que antes era considerada constante, é agora conhecida por aumentar com o número de espécies na teia (COHEN et al. 1990, Hall et al. 1991). No entanto, estudos mais recentes (BANAŠEK-RICHTER et al., 2009; RIEDE et al., 2010) demonstram que essa relação nem sempre é direta ou linear, um exemplo disso é a rede da planta *Inga vera* desse trabalho, que mesmo tendo o maior número de espécies em comparação com todas as outras redes ela não teve a maior densidade de links.

5. CONCLUSÃO

Por meio do uso do Rstudio e dos pacotes "cheddar", "tidyverse", "igraph" e "ggplot2", foi possível realizar uma análise abrangente das redes de interação da espécie *Senegalia tenuifolia*, *Brassica Oleracea*, *Piptadenia Gonoacantha*, *Leucaena Leucocephala*, *Inga Vera* e *Senna multijuga* desenvolvidas no laboratório. Essa análise contribui para o avanço do conhecimento sobre as interações ecológicas presentes nessas redes, fornecendo informações valiosas sobre a estrutura e a dinâmica dos ecossistemas estudados.

A união entre a ecologia e a computação é muito importante. Com a ajuda de programas como o R e o uso de linguagens computacionais, podemos estudar os ecossistemas de maneira mais aprofundada. Com essas ferramentas, conseguimos entender melhor como os seres vivos interagem uns com os outros e com o ambiente. Além disso, conseguimos criar modelos que nos ajudam a prever possíveis mudanças no ambiente.

REFERÊNCIAS

- BANAŠEK-RICHTER, C.; BERSIER, L.F.; CATTIN, M.F.; BALTENSBERGER, R.; GABRIEL, J.P.; MERZ, Y.; ULANOWICZ, R. E.; TAVARES, A. F.; WILLIAMS, D. D.; RUITER, P.C.D.E.; WINEMILLER, K. O.; NAISBIT R. E. **Complexity in quantitative food webs**. *Ecology*, v. 90, n. 6, p. 1470-1477, 2009.
- COHEN, J.E.; NEWMAN, C.M.; BRIAND, F.; PALKA, Z.J. **A Stochastic Theory of Community Food Webs**. *Community Food Webs. Biomathematics*, vol 20. Springer, Berlin, Heidelberg.1990.
- CSARDI, G.; NEPUSZ, T. **The igraph software package for complex network research**. *InterJournal, complex systems*, v. 1695, n. 5, p. 1-9, 2006.
- DE OLIVEIRA T. C. T.; MORALES-SILVA T.; BRANDÃO-DIAS P. F. P. ; EGAN S. P.; ZALDÍVAR-RIVERÓN A.; OLIVEIRA G. M.; DUARTE DA SILVA V. H.; FARIA L. D. B. **The relationship between host plant traits and biodiversity across three sympatric seed-feeding tri-trophic systems in a tropical region of Brazil**. *Insect Conservation and Diversity*, v. 16, n. 5, p. 712-724, 2023.
- DUNNE, J.A.; WILLIAMS, R. J.; MARTINEZ, N. D. **Network structure and biodiversity loss in food webs: robustness increases with connectance**. *Ecology letters*, v. 5, n. 4, p. 558-567, 2002.
- ESTRADA, E. **Food webs robustness to biodiversity loss: the roles of connectance, expansibility and degree distribution**. *Journal of theoretical biology*, v. 244, n. 2, p. 296-307, 2007.
- GURR, G. M.; WRATTEN, S. D.; LUNA, J. M. **Multi-function agricultural biodiversity: pest management and other benefits**. *Basic and Applied Ecology*, v. 4, n. 2, p. 107-116, 2003.
- HALL, S. J.; RAFFAELLI, D. **Food-web patterns: lessons from a species-rich web**. *The Journal of Animal Ecology*, p. 823-841, 1991.
- HUDSON L.N.; EMERSON, R.; JENKINS, G. B.; LAYER K.; LEDGER M. E.; PICHLER, D. E.; THOMPSON, M. S. A.; O'GORMAN, E. J.; WOODWARD, G.; REUMAN, D. C. **Cheddar: analysis and visualisation of ecological communities in R**. *Methods in Ecology and Evolution*, v. 4, n. 1, p. 99-104, 2013.
- JORDANO, P. **Sampling networks of ecological interactions**. *Functional ecology*, v. 30, n. 12, p. 1883-1893, 2016.
- KABACOFF, R. **R in action: data analysis and graphics with R and Tidyverse**. Simon and Schuster, 2022.
- LOEHLE, C.; LI, Bai-Lian. **Habitat destruction and the extinction debt revisited**. *Ecological applications*, v. 6, n. 3, p. 784-789, 1996.

MAIA, L. F.; NASCIMENTO, A. R.; FARIA, L. D. B. **Four years host–parasitoid food web: testing sampling effort on trophic levels.** *Studies on Neotropical Fauna and Environment*, v. 53, n. 2, p. 132-142, 2018.

MARTINEZ, N. D. **Constant connectance in community food webs.** *The American Naturalist*, v. 139, n. 6, p. 1208-1218, 1992.

MAY, R. **Will a large complex system be stable?** *Nature*, v. 238, n. 5364, p. 413-414, 1972.

MORALES-SILVA, T.; MONTEIRO, A.; FARIA, L. D. B. **Multitrophic web of insects associated with *Piptadenia gonoacantha* (Mart.) Macbr.(Fabaceae) and their relationship with resource traits.** *Arthropod-Plant Interactions*, v. 12, p. 553-565, 2018.

MORALES-SILVA, T.; SILVA, B. C.; SILVA, V. H.; FARIA, L. D. B. **Simplification effect of lead soil contamination on the structure and function of a food web of plant-associated insects.** *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 354, p. 108570, 2023.

OLIS, G.A.; STRONG, D.R. **Food web complexity and community dynamics.** *The American Naturalist*. v.147, p. 812-846, 1996.

PEDROSO, B. M.; MORALES-SILVA, T.; FARIA, L. D. B. **Dominant parasitoid species diminishes food web structural complexity and function.** *Journal of Insect Conservation*, v. 25, p. 671-682, 2021.

PINHEIRO, R. B. P. **As topologias de redes de interações ecológicas e suas origens.** 2019.

POCOCK, M. J.O.; EVANS, D. E.; FONTAINE, C.; HARVEY, M.; MCLAUGHLIN, R. J. Ó.; SILVERTOWN, J.; TAMADDONI-NEZHAD, A.; WHITE, P. C.L.; BOHAN, D. A. **The visualisation of ecological networks, and their use as a tool for engagement, advocacy and management.** *Advances in ecological research.* Academic Press, 2016. p. 41-85.

POLIS, G.A.; STRONG, D.R. **Food web complexity and community dynamics.** *The American Naturalist*. v.147, p. 812-846, 1996.

RIEDE, J. O.; RALL, B. C.; BANASEK-RICHTER, C.; NAVARRETE, S. A.; WIETERS, E. A.; EMMERSON, M. C.; JACOB, U.; BROSE, U. **Scaling of food-web properties with diversity and complexity across ecosystems.** *Advances in ecological research.* Academic Press, 2010. p. 139-170.

TEAM R. **RStudio: Integrated Development for R.** Versão 2023.06.0+421 [Boston]: Posit. 2023.

TYLIANAKIS, J. M.; TSCHARNTKE, T.; LEWIS, O. T. **Habitat modification alters the structure of tropical host–parasitoid food webs.** *Nature*, v. 445, n. 7124, p. 202-205, 2007.

WÄCKERS, F. L.; VAN RIJN, P.; HEIMPEL, G. E. **Honeydew as a food source for natural enemies: making the best of a bad meal?.** *Biological Control*, v. 45, n. 2, p. 176-184, 2008.