



ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI
BOLOGNA

Dipartimento di Informatica — Scienza e Ingegneria
Corso di Laurea Magistrale in Informatica

Analisi delle Reti Sociali Animali per il Benessere e la Conservazione delle Specie

Relatore:
Chiar.mo Prof.
Saverio Giallorenzo

Presentata da:
Francesco Corigliano

I Sessione
Anno Accademico 2025/2026

Ad Aaron e Nino, woof!

Indice

1	Introduzione	1
2	Breve introduzione alla Social Network Analysis	5
3	Revisione della letteratura	7
3.1	Query e ricerca del materiale	8
3.2	Filtro	9
3.3	Pertinenza alle domande di ricerca	10
3.4	Snowballing	11
3.5	Considerazioni sul materiale raccolto	11
4	Reti animali: caratteristiche e interpretazioni	13
4.1	Panoramica sulle reti sociali animali	13
4.2	Rappresentazione e tipi di rete	14
4.3	Misure e interpretazioni	16
4.3.1	Misure strutturali	16
4.3.2	Misure di centralità e ruolo	17
4.3.3	Misure mesoscopiche e strutture comunitarie	18
4.3.4	Interpretazioni biologiche	21
5	Caso di studio	25
5.1	Specie e dataset esaminati	25
5.1.1	Struttura del dataset	27
5.1.2	Collezione e preprocessing	27

5.1.3	Strumenti utilizzati	28
5.2	Visualizzazione della rete	29
5.3	Metodologia per interpretazione e analisi dei dati	30
5.4	Struttura	32
5.5	Centralità	36
5.6	Comunità	39
6	Valutazione dei risultati e interpretazioni	49
6.1	Note su validità, affidabilità e limiti interpretativi	49
6.2	Risultati del caso di studio	51
6.3	Interpretazioni e confronto con la letteratura	53
6.3.1	Connettività, coesione e struttura modulare	55
6.3.2	Degree, centralità e ruoli strutturali	56
6.3.3	Sesso, centralità e attributi individuali	57
6.3.4	Tipologie di relazione, reciprocità e omofilia	58
6.4	Sintesi di risultati e interpretazioni	60
7	Conclusioni	65
	Bibliografia	72
	Ringraziamenti	73

Elenco delle figure

3.1	Schema del processo di revisione della letteratura	7
3.2	Flusso di selezione degli articoli nelle diverse fasi della revisione della letteratura	12
5.1	Rete sociale dei pinguini di Kyoto	30
5.2	Gradi dei nodi	33
5.3	Indegree e outdegree dei nodi	34
5.4	Reciprocità per tipo di relazione	40
5.5	Omofilia per tipo di relazione	41
5.6	Clustering	42
5.7	Cliques da 3	44
5.8	Cliques da 4	45
5.9	K-core da 3	46
5.10	Comunità individuate dall'algoritmo di Louvain	47

Elenco delle tabelle

4.1	Misure e interpretazioni dei casi studio trovati in letteratura	24
5.1	Tipi di connessione nel grafo	29
5.2	Top 10 nodi per grado	34
5.3	Top 10 nodi per indegree e outdegree	35
5.4	Misure di connettività nella rete dei pinguini	36
5.5	Misure di degree, closeness e betweenness centrality	37
5.6	Misure di eigenvector e load centrality	39
6.1	Confronto tra il dataset di Kyoto e i dataset considerati nella letteratura.	54
6.2	Sintesi del confronto tra caso di studio e letteratura.	62

Capitolo 1

Introduzione

Negli ultimi decenni, la crescente pressione antropica sugli ecosistemi naturali ha portato a un'accelerazione significativa dei processi di perdita di biodiversità. La frammentazione degli habitat, il cambiamento climatico, l'inquinamento e lo sfruttamento delle risorse naturali stanno contribuendo in modo rilevante al declino di numerose specie animali in tutto il mondo. In questo contesto, la conservazione della biodiversità e la tutela del benessere animale rappresentano oggi ambiti di ricerca e intervento di fondamentale importanza sia dal punto di vista ecologico che etico.

La conservazione delle specie non si limita alla protezione dei singoli individui, ma si estende alla comprensione delle dinamiche sociali, comportamentali ed ecologiche che regolano le popolazioni animali. Le interazioni sociali, in particolare, giocano un ruolo cruciale nella sopravvivenza, nella riproduzione e nella trasmissione di informazioni all'interno dei gruppi. Per questo motivo, lo studio delle strutture sociali può fornire informazioni preziose per comprendere meglio il funzionamento delle popolazioni e migliorare le strategie di conservazione.

In tale contesto, la Social Network Analysis (SNA) si configura come un approccio metodologico particolarmente efficace per analizzare le relazioni tra individui all'interno di una popolazione animale. Attraverso la rappresentazione delle interazioni come una rete, la SNA consente di identificare pattern

sociali, individui chiave, strutture di gruppo e dinamiche di connessione che non sarebbero facilmente osservabili con metodi tradizionali.

L'obiettivo di questa tesi è quindi quello di applicare le tecniche di SNA al campo dell'*Animal Welfare and Conservation*, al fine di esplorare come la struttura delle reti sociali animali possa fornire informazioni utili per la comprensione del comportamento collettivo e per il supporto alle strategie di conservazione. In particolare, il lavoro si propone di analizzare come le relazioni tra individui influenzino la coesione del gruppo, il flusso di informazioni e, potenzialmente, la resilienza della popolazione.

Attraverso questo approccio, la tesi mira a evidenziare il valore della SNA come strumento interdisciplinare in grado di collegare ecologia comportamentale, biologia della conservazione e analisi dei dati complessi.

Inizialmente, viene condotta una revisione della letteratura al fine di inquadrare lo stato dell'arte nei campi dell'Animal Welfare, della conservazione delle specie e della SNA applicata agli studi comportamentali.

Successivamente, vengono formulate le domande di ricerca a supporto dello studio, con l'obiettivo di guidare l'analisi e definire in modo chiaro gli aspetti investigativi della tesi. La definizione delle domande di ricerca è utile per fornirci una panoramica di metodi e misure applicate nell'utilizzo della SNA nello studio delle reti animali ed ecologiche. Le domande di ricerca considerate sono le seguenti:

- 1. Quali sono le caratteristiche strutturali delle reti sociali animali ed ecologiche?**
- 2. Quali misure di Social Network Analysis vengono utilizzate per analizzare tali reti?**
- 3. In che modo tali misure contribuiscono all'interpretazione biologica, ecologica e di conservazione?**

La tesi è strutturata come segue.

Il Capitolo 2 fornisce il background teorico sulla SNA, introducendo i concetti fondamentali necessari alla comprensione delle analisi successive.

Il Capitolo 3 è dedicato alla revisione della letteratura e descrive il processo di raccolta e selezione delle fonti, includendo le strategie di ricerca, i criteri di filtro, la valutazione della pertinenza rispetto alle domande di ricerca e l'utilizzo del metodo dello snowballing, oltre a una sintesi del materiale analizzato.

Nel Capitolo 4 vengono presentate le reti sociali animali, le loro caratteristiche principali e le principali tipologie di rappresentazione, insieme alle misure utilizzate per la loro analisi, incluse le misure strutturali, di centralità e le metriche relative alle strutture comunitarie, con una discussione sulle possibili interpretazioni biologiche dei risultati.

Il Capitolo 5, dedicato al caso studio, descrive il dataset utilizzato e il processo di costruzione della rete, includendo la struttura dei dati, le fasi di collezione e preprocessing, gli strumenti adottati e le modalità di visualizzazione della rete. Viene inoltre presentato lo studio sperimentale, illustrando la metodologia adottata per l'analisi dei dati e l'applicazione delle misure di struttura, centralità e comunità.

Nel Capitolo 6 viene proposta una valutazione empirica dei risultati ottenuti nel caso di studio. Il capitolo discute inizialmente aspetti di validità, affidabilità e limiti interpretativi dell'analisi, per poi presentare i risultati principali e confrontarli con le interpretazioni emerse dalla letteratura.

Infine, il Capitolo 7 raccoglie le conclusioni del lavoro, una discussione critica dei risultati e possibili sviluppi futuri della ricerca.

Capitolo 2

Breve introduzione alla Social Network Analysis

La Social Network Analysis è una metodologia utilizzata per studiare le relazioni e le interazioni tra individui all'interno di una rete sociale. Attraverso specifiche metriche, permette di analizzare il ruolo degli individui all'interno della rete e il livello di connessione dell'intero sistema sociale.

Nata nell'ambito delle scienze sociali per analizzare le connessioni tra persone e comunità, questa tecnica è stata successivamente applicata a numerosi altri settori, grazie alla sua capacità di rappresentare sistemi complessi attraverso nodi e relazioni: i nodi identificano gli individui o gli attori della rete, mentre gli archi rappresentano le connessioni o le interazioni tra essi.

Nel corso degli anni, la SNA ha trovato applicazione in numerosi ambiti di ricerca. Nelle scienze sociali viene utilizzata per studiare comunità, gruppi sociali e diffusione delle informazioni; in informatica e nei social media viene impiegata per analizzare la propagazione di contenuti, l'influenza degli utenti e la diffusione della disinformazione. In ambito sanitario ed epidemiologico, la SNA viene utilizzata per comprendere la trasmissione delle malattie all'interno di una popolazione, mentre nel settore economico e organizzativo permette di analizzare collaborazioni, strutture aziendali e reti di comunicazione.

Negli ultimi anni, la SNA ha trovato ampia applicazione anche nello studio delle reti ecologiche e delle società animali. Le reti ecologiche rappresentano sistemi di interazioni biologiche tra individui, gruppi o specie differenti. In questo contesto, i nodi rappresentano organismi o popolazioni, mentre gli archi descrivono relazioni biologiche come cooperazione, competizione, parentela, trasmissione di informazioni o diffusione di malattie. Vengono utilizzate in numerosi ambiti della biologia comportamentale, ad esempio per studiare gerarchie sociali, dinamiche di cooperazione, diffusione di informazioni e impatto dei cambiamenti ambientali sulle popolazioni animali.

In questo contesto la SNA consente di analizzare le relazioni dirette e indirette tra individui, che influenzano il comportamento collettivo e l'organizzazione sociale del gruppo. Questo approccio si è rivelato particolarmente utile nello studio della socialità animale, poiché permette di supportare attività di conservazione e gestione animale, consentendo di individuare individui centrali o sottogruppi particolarmente importanti per la stabilità della popolazione.

Grazie alla capacità di rappresentare sistemi complessi in modo quantitativo e visuale, la combinazione tra Social Network Analysis e reti ecologiche costituisce oggi uno strumento fondamentale per lo studio delle dinamiche sociali negli animali e per la comprensione dei processi che emergono dalle loro interazioni.

Capitolo 3

Revisione della letteratura

Per la raccolta e l'analisi del materiale relativo agli studi considerati, è stato adottato un approccio sistematico basato su linee guida consolidate per la conduzione di revisioni della letteratura [1] [2]. Il processo seguito è riassunto in Figura 3.1.

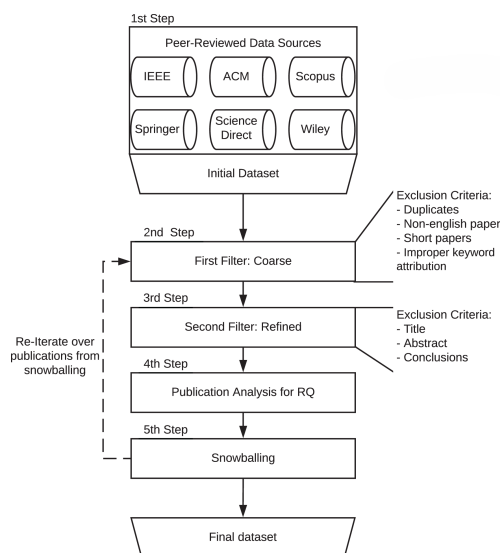


Figura 3.1: Schema del processo di revisione della letteratura

3.1 Query e ricerca del materiale

Le pubblicazioni peer-reviewed sono state recuperate tramite database bibliografici e piattaforme editoriali, tra cui Scopus, Web of Science, IEEE, ACM, e tramite editori scientifici come Elsevier (ScienceDirect), Springer e Wiley. I dataset sono stati individuati attraverso repository pubblici di reti, tra cui ICON (Index of Complex Networks) e Network Repository.

Sono state costruite le seguenti query di ricerca combinando tre componenti principali:

- il metodo: "social network analysis", "network analysis"
- il dominio: "animals", "animal social networks", "ecological networks"
- l'obiettivo: "conservation", "species conservation", "wildlife conservation", "endangered species"

In una prima fase, la ricerca è stata focalizzata sull'applicazione della SNA per informare strategie di conservazione delle specie a rischio. A tal fine, sono state utilizzate le seguenti query:

- social network analysis AND endangered species
- social network analysis AND species conservation
- network analysis AND endangered species
- ecological networks AND endangered species

Tuttavia, la quantità di materiale trovato è risultata insufficiente, quindi si è deciso di allargare lo scope di ricerca all'utilizzo della SNA sulle reti animali in generale, cercando di mantenere comunque un interesse per le possibili implicazioni ecologiche e di conservazione ma escludendo lo studio specifico delle specie a rischio. Il poco materiale trovato è stato mantenuto tra le fonti poiché utile allo studio.

Le query sono quindi state estese come segue:

- animal social network
- animal social network analysis
- social network analysis AND animals
- social network analysis AND animal conservation
- social network analysis AND wildlife conservation
- social network analysis AND animal welfare

Questa volta è emerso un numero maggiore di lavori rilevanti, per un totale di 59 pubblicazioni individuate. Data la natura multidisciplinare della tesi, che coinvolge ambiti quali Social Network Analysis, analisi dei dati, ecologia e biologia, **sono stati considerati anche alcuni lavori non strettamente focalizzati sulla Social Network Analysis**. Tali articoli, pur non rientrando nel pool principale utilizzato per lo studio di SNA, sono stati mantenuti come riferimento teorico in quanto utili per **l'interpretazione dei fenomeni biologici ed ecologici**. I lavori individuati sono stati successivamente sottoposti a un processo di filtraggio, descritto nella sezione seguente. **I criteri di filtraggio sono stati definiti in coerenza con le domande di ricerca**, al fine di selezionare esclusivamente gli studi in grado di fornire informazioni utili rispetto agli obiettivi dell'analisi.

3.2 Filtro

Per la prima fase di filtraggio sono stati definiti i seguenti criteri di esclusione:

- Articoli duplicati
- Pubblicazioni non redatte in lingua inglese
- Pubblicazioni con attribuzioni improprie di keyword

- Pubblicazioni prive di contenuto metodologico rilevante (ad esempio articoli brevi e lavori senza descrizione delle misure/metodologie utilizzate)

Nella seconda fase di filtraggio, è stata effettuata una **valutazione qualitativa** dei lavori selezionati attraverso l'**analisi di titolo, abstract e conclusioni**, al fine di verificarne la **pertinenza rispetto allo studio della Social Network Analysis e di contesti animali, biologici o ecologici**. Durante questa fase sono stati esclusi diversi articoli non rilevanti per la ricerca. In particolare, sono stati scartati lavori relativi a:

- aspetti teorici generali della SNA non applicati a contesti animali;
- reti di stakeholder coinvolti in governance ambientale o conservation development;
- reti di trafficanti di animali
- gestione delle risorse naturali e politiche ambientali;
- analisi basate su social media (es. popolarità di specie animali su piattaforme online);
- studi di ecologia comportamentale non basati su approcci di network analysis;
- approcci di machine learning e modelli generativi di reti

Solo alcuni degli articoli relativi a questi argomenti citati (ecologia comportamentale in particolare) sono stati mantenuti come riferimento teorico, qualora utili per l'interpretazione dei fenomeni biologici ed ecologici. Al termine di questa fase, il numero di articoli selezionati è stato ridotto a 42.

3.3 Pertinenza alle domande di ricerca

Per ciascun articolo è stato esaminato il **testo completo**, considerando il tipo di rete studiata, le misure di SNA applicate e gli obiettivi dello stu-

dio (descrizione, predizione, conservazione). Sulla base di tali elementi, gli articoli sono stati classificati in funzione del loro **contributo rispetto alle domande di ricerca** definite. In particolare, sono stati esclusi gli studi che non soddisfacevano almeno uno dei seguenti criteri:

- descrizione delle caratteristiche strutturali delle reti animali o ecologiche;
- utilizzo di misure di SNA per l'analisi delle reti;
- interpretazione di risultati in ambito biologico, ecologico o di conservazione.

Al termine di questa fase, il numero di articoli selezionati è stato ridotto a 31.

3.4 Snowballing

È stata inoltre applicata la tecnica di snowballing, analizzando le citazioni presenti negli articoli selezionati al fine di individuare ulteriori lavori rilevanti, sottoposti successivamente al filtraggio. Questa procedura ha permesso di identificare 2 ulteriori pubblicazioni.

3.5 Considerazioni sul materiale raccolto

Il corpus principale della revisione è costituito da 21 articoli inerenti alla Social Network Analysis, affiancati da ulteriori 12 lavori di supporto provenienti da discipline correlate (biologia, ecologia, ecc.), per un numero complessivo di **33 articoli**.

La seguente figura riassume il processo di raccolta effettuato. 3.2.

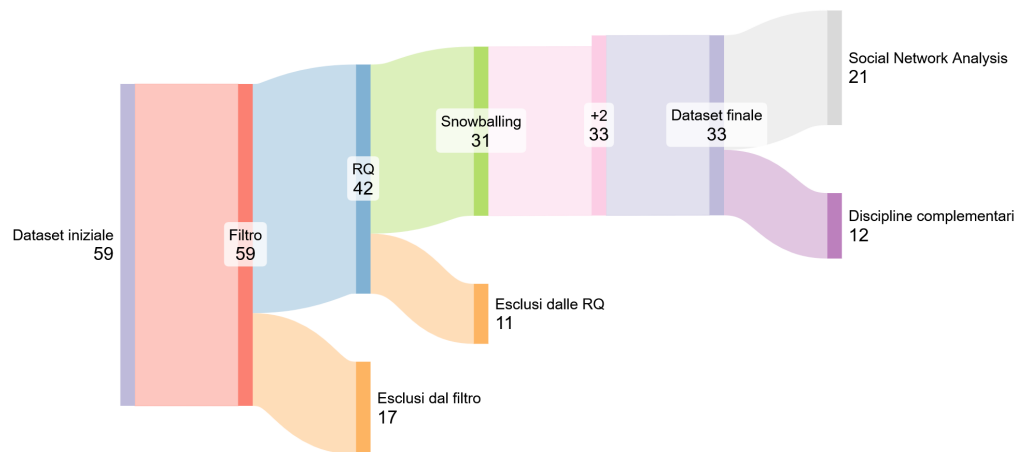


Figura 3.2: Flusso di selezione degli articoli nelle diverse fasi della revisione della letteratura

Capitolo 4

Reti animali: caratteristiche e interpretazioni

4.1 Panoramica sulle reti sociali animali

Lo studio delle reti sociali animali rappresenta un approccio centrale per comprendere la socialità in biologia ed ecologia comportamentale. La Social Network Analysis consente di formalizzare le interazioni tra individui permettendo di descrivere in modo quantitativo la complessità delle società animali.

Rispetto agli approcci tradizionali basati su statistiche aggregate a livello di gruppo, la SNA permette di preservare l'informazione relazionale tra individui, rendendo possibile lo studio di un'ampia gamma di fenomeni come la formazione di sottogruppi, la stabilità delle strutture sociali (tramite interazioni agonistiche, legami affiliativi e relazioni di parentela) e processi di trasmissione sociale come la diffusione di informazioni, comportamenti, segnali o agenti patogeni [24]. Questo è particolarmente rilevante nei sistemi biologici, dove le dinamiche collettive come riproduzione, coesione e trasferimento di informazioni dipendono fortemente da **interazioni indirette** e non solo da contatti diretti tra individui [14, 10, 26, 20].

Le reti vengono spesso analizzate come istantanee statiche in un deter-

minato intervallo di tempo, ma si sta iniziando a passare verso analisi più dinamiche di come la struttura sociale cambi nel tempo, per comprendere come le popolazioni animali possano adattarsi socialmente ai cambiamenti.

4.2 Rappresentazione e tipi di rete

Formalmente, una rete sociale animale è rappresentata come un grafo $G = (V, E)$, dove V è l'insieme dei nodi (individui o gruppi) ed E l'insieme degli archi (relazioni o interazioni).

Gli archi rappresentano le relazioni o le interazioni tra individui e possono essere codificati in diversi modi a seconda del comportamento osservato e della domanda di ricerca. In ambito animale, le relazioni possono includere interazioni sociali ben studiate, come comportamenti agonistici o relazioni affiliative, ma anche eventi di trasmissione di patogeni, segnali o apprendimento sociale, condivisione di risorse come cibo, territori o calore corporeo, e legami di parentela [28]. A seconda della natura biologica dell'interazione, ogni arco può essere diretto o non diretto, pesato o non pesato. In molti casi gli archi sono binari, indicando semplicemente la presenza o l'assenza di una relazione; in altri casi possono invece essere pesati per rappresentare l'intensità, la frequenza o la durata delle interazioni tra individui.

Le principali tipologie di reti includono:

- **Reti dirette:** le relazioni hanno una direzione (es. dominanza, parentela, interazioni asimmetriche);
- **Reti non dirette:** le relazioni sono mutuali (es. associazioni, prossimità);
- **Reti statiche:** rappresentano le relazioni in un singolo momento o periodo aggregato
- **Reti dinamiche:** descrivono l'evoluzione delle interazioni nel tempo.
- **Reti pesate:** ogni relazione possiede un'intensità o un peso associato;

- **Signed networks:** le interazioni positive (es. affiliative) vengono rappresentate con pesi positivi degli archi, mentre quelle negative (es. agonistiche o di evitamento) con pesi negativi;
- **Reti multilivello:** includono simultaneamente più tipi di relazioni tra gli stessi individui;
- **Reti bipartite (o two-mode):** collegano due differenti tipi di nodi, senza permettere connessioni tra nodi dello stesso tipo. Sono comunemente utilizzate nello studio delle reti ecologiche, ad esempio pianta–impollinatore, ospite–patogeno oppure relazioni tra individui e luoghi visitati;
- **Reti tripartite:** includono tre tipi di nodi, ad esempio individui, posizioni spaziali e istanti temporali;
- **Hypergraphs:** reti higher-order, rappresentano una generalizzazione delle reti diadiche, permettendo agli hyperedge di collegare simultaneamente più individui. Ad esempio, tre individui A, B e C osservati insieme nello stesso gruppo possono essere collegati tramite un singolo hyperedge. Gli hypergraph sono particolarmente utili per rappresentare reti basate su eventi di gruppo;

La scelta della rappresentazione di rete più adatta dipende principalmente dalla domanda di ricerca e dalle caratteristiche dei dati disponibili. In generale, l'obiettivo dello studio dovrebbe guidare la selezione dell'approccio metodologico: rappresentazioni più semplici possono essere sufficienti per analizzare relazioni diadiche tra individui, mentre approcci più complessi, come reti multilayer, pesate o higher-order, risultano più appropriati quando si vogliono studiare interazioni multiple o dinamiche collettive [18].

Anche i **vincoli di campionamento** hanno un ruolo importante. Alcune rappresentazioni richiedono grandi quantità di dati e osservazioni molto dettagliate, come informazioni sulla frequenza, la durata o il momento temporale

delle interazioni. Per questo motivo, reti dinamiche o multilivello sono generalmente più costose in termini di raccolta dati rispetto a rappresentazioni più tradizionali o locali, come le ego networks.

Un ulteriore aspetto riguarda la disponibilità di strumenti analitici e risorse computazionali. Approcci più recenti o complessi, come signed networks e higher-order networks come gli ipergrafi, dispongono di meno strumenti consolidati e possono richiedere implementazioni personalizzate, oltre a costi computazionali maggiori. Di conseguenza, tali rappresentazioni dovrebbero essere adottate solo quando forniscono un vantaggio concreto nell'interpretazione del fenomeno studiato.

4.3 Misure e interpretazioni

4.3.1 Misure strutturali

Le reti sociali vengono analizzate attraverso misure quantitative che descrivono proprietà locali e globali della struttura. Queste misure possono essere utilizzate per individuare stati o tendenze che potrebbero alterare la struttura della rete nel tempo.

A livello globale, abbiamo misure di gruppo come la **densità**, che misura la proporzione di connessioni osservate rispetto al totale possibile, fornendo una stima generale della **coesione** della rete e classificandola come socialmente integrata o frammentata. Misurare la coesione è particolarmente importante negli studi in cattività, dato che il mantenimento della stabilità della rete sociale e il benessere degli individui dipendono spesso dalle decisioni gestionali [28]. L'**average path length (APL o lunghezza media dei cammini)** e il **diametro** descrivono invece quanto rapidamente gli individui possono raggiungersi all'interno della rete, prendendo come unità di misura i nodi stessi.

Passando alle misure individuali, una delle più semplici è il **grado (degree)**, che rappresenta il numero di connessioni dirette di un nodo. Nelle reti

dirette si distinguono indegree e outdegree, che riflettono rispettivamente le relazioni ricevute e quelle emesse.

Dal punto di vista biologico, il grado può essere interpretato come una misura dell'attività sociale o del potenziale di interazione di un individuo [10]. L'indegree può riflettere quanto un animale non infetto sia suscettibile all'infezione, mentre l'outdegree può indicare quanto un animale infetto possa essere contagioso. Gli stessi principi si applicano anche ad altre forme di trasmissione, come la diffusione di informazioni contenute nei segnali e la propagazione di innovazioni comportamentali.

4.3.2 Misure di centralità e ruolo

Le misure di centralità permettono di identificare il ruolo strutturale degli individui all'interno della rete sociale, definendone il livello di influenza.

La **degree centrality** quantifica il numero di connessioni dirette, mentre la **closeness centrality** misura quanto rapidamente un individuo può raggiungere tutti gli altri nodi attraverso il percorso più breve.

La **betweenness centrality** identifica invece gli individui che si trovano frequentemente lungo i cammini minimi tra altri nodi, indicando un ruolo di intermediazione (o "brokeraggio") all'interno della rete. Questi individui sono spesso cruciali per mantenere la connettività globale e facilitare il flusso di informazioni nella rete. Quando i broker vengono rimossi, le reti possono frammentarsi.

In reti caratterizzate da una distribuzione relativamente uniforme dei legami e dalla presenza di pochi cluster o clique, la betweenness centrality tende a essere distribuita in modo più normale tra gli individui ed è maggiormente correlata al grado. In questi casi la rimozione di individui con alta betweenness produce effetti simili alla rimozione di individui con alto grado.

Al contrario, nelle reti maggiormente clusterizzate, i valori di betweenness risultano distribuiti in modo più asimmetrico tra gli individui e mostrano una relazione meno stretta con il grado. In questi casi la rimozione di indi-

vidui con elevata betweenness ha probabilmente un impatto maggiore sulla coesione della rete rispetto alla rimozione di individui con alto degree.

La **eigenvector centrality** estende il concetto di centralità considerando non solo il numero di connessioni, ma anche l'importanza dei nodi a cui si è connessi. Ciò fornisce una misura di influenza e popolarità globale, che può indirettamente migliorare la fitness e l'accettazione sociale dell'individuo [17].

Il **reach** misura il grado di connessione di un individuo in base al grado di separazione dagli altri nodi, indicando quindi il potenziale di diffusione di informazioni, comportamenti o interazioni all'interno della rete. Formalmente, viene calcolato contando il numero di nodi che possono essere raggiunti in k passi o meno. Quando $k = 1$, il reach coincide con la degree centrality, mentre per valori maggiori di k tiene conto anche dei collegamenti indiretti, fornendo una misura più ampia del potenziale di influenza o diffusione all'interno della rete. Le interazioni cooperative originate da individui con elevato reach possono diffondersi rapidamente attraverso la rete tramite meccanismi di scambio generalizzato; ricevendo un servizio da un individuo con alto reach, i partner diretti possono a loro volta fornire un servizio ai propri partner diretti, che successivamente possono fare lo stesso con i loro contatti, e così via.

4.3.3 Misure mesoscopiche e strutture comunitarie

Le reti sociali animali mostrano frequentemente una struttura modulare, in cui gli individui tendono a organizzarsi in comunità o sottogruppi caratterizzati da una maggiore densità di connessioni interne rispetto a quelle con il resto della rete. Queste comunità possono essere identificate attraverso algoritmi di clustering o tecniche di massimizzazione della modularità. La presenza di comunità indica che la rete non è omogenea, ma organizzata in blocchi funzionali.

Il **clustering coefficient** misura la tendenza degli individui a formare triadi o gruppi chiusi. Valori elevati indicano una forte presenza di sottogrup-

più locali e relazioni ridondanti, mentre valori bassi suggeriscono una struttura più dispersa e meno localmente organizzata.

Una misura strettamente collegata è la **transitività**, che descrive la probabilità che due individui connessi a un terzo individuo siano a loro volta collegati tra loro. In termini sociali, la transitività riflette il principio secondo cui “gli amici dei miei amici tendono a essere miei amici”. Sebbene sia concettualmente simile al clustering coefficient, la transitività rappresenta una misura globale della chiusura delle triadi all’interno dell’intera rete, mentre il clustering coefficient può essere calcolato anche a livello locale per singolo nodo.

La **reciprocità**, invece, riguarda specificamente le reti dirette e misura la tendenza delle relazioni ad essere mutuali. Una relazione è reciproca quando due individui sono collegati in entrambe le direzioni, ad esempio quando due animali mostrano comportamenti affiliativi o agonistici reciproci. Elevati livelli di reciprocità suggeriscono relazioni più bilanciate e stabili, mentre valori bassi possono indicare strutture sociali maggiormente gerarchiche o asimmetriche, come nel caso delle reti di dominanza. Insieme alla transitività forniscono informazioni sul livello di equilibrio e coesione delle relazioni sociali all’interno della rete.

Le **cliques** rappresentano sottogruppi completamente connessi, in cui ogni individuo è direttamente collegato a tutti gli altri membri del gruppo. Le cliques costituiscono quindi forme estreme di coesione locale e possono indicare alleanze molto stabili o gruppi socialmente molto integrati. A differenza del clustering coefficient e della transitività, che misurano una tendenza generale alla formazione di gruppi chiusi, le cliques identificano strutture esplicitamente complete e perfettamente connesse.

La **cliquishness** descrive il grado con cui una rete è suddivisa in sottogruppi coesi. Valori elevati di clustering o cliquishness indicano che la trasmissione di fenomeni come malattie, informazioni o comportamenti può avvenire in modo rapido e completo all’interno di un sottogruppo, ma più lentamente nel resto della rete, poiché gli eventi di trasmissione tendono a ri-

manere confinati all'interno delle clique. Questo può avere effetti sia positivi sia negativi, ad esempio riducendo oppure limitando la diffusione di malattie o informazioni all'interno dell'intera popolazione.

Un ulteriore strumento per analizzare la coesione della rete è il **k-core**. Un k-core è un sottografo in cui ogni nodo possiede almeno k connessioni con altri nodi appartenenti allo stesso sottografo. Aumentando il valore di k , vengono selezionate porzioni sempre più dense e coese della rete. Diversamente dalle cliques, i k-core non richiedono che tutti i nodi siano direttamente connessi tra loro, ma identificano regioni caratterizzate da un elevato livello generale di connettività.

Oltre alla struttura comunitaria, è possibile analizzare le **componenti connesse** della rete. Una componente è un sottogruppo di nodi in cui ogni individuo è raggiungibile dagli altri, ma che non presenta connessioni con il resto della rete. La presenza di più componenti indica una separazione tra gruppi di individui.

Per identificare comunità su scala più ampia vengono spesso utilizzati algoritmi di **community detection**, tra cui uno dei più diffusi è l'**algoritmo di Louvain**. Questo metodo suddivide automaticamente la rete in comunità massimizzando la modularità, ovvero la differenza tra il numero di connessioni osservate all'interno delle comunità e quello atteso in una rete casuale equivalente. A differenza delle cliques e dei k-core, che individuano sottostrutture fortemente dense a livello locale, il metodo di Louvain analizza l'organizzazione globale della rete, identificando gruppi di individui maggiormente connessi internamente rispetto al resto della popolazione.

Dal punto di vista biologico, queste misure e caratteristiche possono riflettere gruppi familiari, alleanze, preferenze sociali o forme di segregazione basate su attributi individuali, contribuendo a descrivere la complessità e i pattern con cui i sottogruppi vengono formati. Sebbene la coesione sociale sia importante, la dispersione degli individui è spesso necessaria per ridurre la competizione e mantenere la diversità genetica all'interno delle popolazioni. Per questo motivo, le decisioni riguardanti quando e dove regolare la

dispersione possono risultare cruciali.

4.3.4 Interpretazioni biologiche

Uno degli aspetti più interessanti della SNA in ambito animale è la possibilità di collegare la struttura della rete a processi biologici e sociali funzionali. L'investimento nei legami sociali tra individui influisce positivamente sullo stato di salute, sul benessere, sulla fitness a lungo termine e sul successo riproduttivo nell'arco della vita.

La posizione di un individuo nella rete può influenzare:

- lo status e la stabilità sociale
- le influenze indirette
- il successo riproduttivo
- la velocità di accesso a informazioni
- il rischio di esposizione a patogeni

In generale, individui altamente connessi possono agire da facilitatori della diffusione di informazioni o comportamenti, ma possono anche essere maggiormente esposti a costi sociali come competizione o rischio di infezione da agenti patogeni. Al contrario, individui periferici possono avere relazioni più stabili ma un accesso ridotto alle dinamiche collettive. Questi **fitness trade-off** rappresentano un elemento chiave per comprendere le complesse dinamiche sociali negli animali e informare strategie di conservazione.

Una comprensione approfondita delle dinamiche sociali può fornire informazioni fondamentali per **supportare la gestione zoologica** nel prendere decisioni consapevoli dal punto di vista del benessere animale. Ad esempio può fornire prove di welfare positivo, informare la gestione di programmi di allevamento e la manipolazione di gruppi, determinare l'uso di risorse in ambienti controllati, e fornire stime su potenziali trasmissioni di malattie [28].

Di seguito sono elencati esempi del rapporto tra sfide ecologiche e soluzioni supportate dalla SNA [14]:

- I gruppi animali vengono spesso trasferiti per scopi di conservazione come controllo della popolazione e ottimizzazione della diversità generica. La SNA permette di monitorare le dinamiche e la struttura sociale dopo la rilocalizzazione o dopo l'introduzione di nuovi individui in un gruppo esistente, così da facilitarne l'integrazione.
- La SNA può identificare gli individui che collegano maggiormente gli altri all'interno della popolazione. Quelli con alta betweenness centrality rappresentano bersagli ideali, ad esempio, per strategie di vaccinazione. Più in generale, l'analisi della connettività consente di stimare processi come la diffusione di malattie e di ottimizzare interventi mirati.
- Quando si considerano interazioni direzionali, la SNA permette di individuare gli individui più centrali, che svolgono ruoli chiave nella struttura sociale e nelle dinamiche di interazione. Le metriche permettono di identificare cambiamenti nelle interazioni e di determinare gli individui o i processi responsabili, contribuendo a prevenire la diffusione di comportamenti indesiderati.
- Quando individui chiave con specifici tratti o ruoli sociali vengono rimossi, i gruppi possono frammentarsi. La SNA consente di capire se tale frammentazione sarà temporanea o permanente e può aiutare a prevedere un possibile collasso della popolazione.
- Gli animali che difendono territori attorno a risorse essenziali possono mostrare un'elevata densità di interazioni agonistiche. La SNA può essere utilizzata per valutare se la redistribuzione delle risorse riduce i conflitti.
- Molte specie modificano il proprio comportamento in risposta ai **disturbi antropici** come frammentazione e sovrasfruttamento dell'habitat. Ad esempio, alcuni animali sociali possono diventare notturni per

evitare l'attività umana. Questo può portare alla formazione di gruppi più grandi, aumentando la sicurezza ma anche il rischio di conflitti sociali. Nel breve termine il cambiamento può sembrare adattivo, ma nel lungo periodo potrebbe ridurre la fitness media. La SNA può supportare il confronto delle reti sociali animali in aree disturbate e non disturbate e determinare l'impatto dei disturbi antropici.

La Tabella 4.1 riassume i principali lavori analizzati in letteratura, evidenziando per ciascuno le misure di Social Network Analysis utilizzate e le interpretazioni biologiche, comportamentali o gestionali associate. La selezione include sia studi empirici basati su casi di studio, sia lavori teorici o di revisione utili a comprendere il significato attribuito alle diverse metriche di rete.

Nel capitolo successivo, questi concetti e misure verranno applicati al caso studio della colonia di pinguini dell'acquario di Kyoto, al fine di analizzare empiricamente la struttura e le proprietà emergenti della rete.

Paper	Misure	Interpretazioni
The Social Network of a Group of White-Fronted Lemurs (<i>Eulemur albifrons</i>) in Managed Care [17]	Densità, Eigenvector Centrality, QAP, Hierarchical Cluster Analysis	La densità viene interpretata come indicatore di coesione sociale, mentre la centralità evidenzia gli individui più integrati o influenti nel gruppo. La posizione centrale di femmine e giovani suggerisce che la struttura sociale non dipenda necessariamente da una rigida dominanza femminile.
Network social dynamics of an ex-situ colony of African penguins following the introduction of unknown conspecifics [8]	Simple Ratio Index, Cluster-fast greedy algorithm, MRQAP, Coefficient of Variation, Network permutation	Le associazioni preferenziali vengono interpretate come indicatori di familiarità, stabilità dei legami e integrazione sociale. La stabilità delle coppie e l'associazione tra individui introdotti insieme suggeriscono che storia relazionale e familiarità influenzino la struttura della colonia.
Social Network Analysis as a Tool in the Care and Wellbeing of Zoo Animals: A Case Study of a Family Group of Black Lemurs (<i>Eulemur macaco</i>) [25]	Reciprocità, Centralizzazione, Degree centrality, Indegree, Outdegree	Le misure di rete vengono interpretate come indicatori di ruoli sociali, pressione aggressiva e possibile vulnerabilità individuale. Un alto indegree nelle interazioni aggressive, combinato con deboli legami affiliativi, può suggerire una condizione di benessere sociale compromesso.
Animal Social Network Theory Can Help Wildlife Conservation [14]	Density, Betweenness centrality, Community detection, Component detection, Time-lagged association rate	Densità, componenti e comunità vengono interpretate come indicatori di integrazione o frammentazione sociale. La betweenness permette di individuare individui ponte, potenzialmente importanti per il flusso di informazioni, comportamenti o patogeni nella popolazione.
The potential of Social Network Analysis as a tool for the management of zoo animals [28]	Degree, Closeness, Betweenness, Eigenvector Centrality, Association indices	Le misure di centralità vengono interpretate come indicatori di connessione sociale, ruolo nella coesione del gruppo e potenziale influenza nei processi di trasmissione. I legami preferenziali e la posizione degli individui possono avere implicazioni per welfare, gestione e stabilità sociale.
Friends of friends: are indirect connections in social networks important to animal behaviour? [22]	Reach, Clustering coefficient, Closeness, Betweenness, Eigenvector Centrality, Information centrality	Le connessioni indirette vengono interpretate come elementi rilevanti per comprendere coesione, accesso a informazioni, cooperazione e trasmissione di comportamenti. La posizione strutturale di un individuo può quindi avere effetti biologici anche oltre i suoi legami diretti.
Does the social network structure of wild animal populations differ from that of animals in captivity? [31]	Indegree, Outdegree, Densità, Average path length, Compactness, Clustering coefficient, Closeness, Betweenness	Le differenze tra reti in natura e in cattività vengono interpretate come effetto del contesto ambientale e gestionale. Spazio, risorse, gruppo sociale e impossibilità di dispersione possono modificare interazioni, associazioni e posizioni individuali nella rete.

Tabella 4.1: Misure e interpretazioni dei casi studio trovati in letteratura

Capitolo 5

Caso di studio

A partire dai risultati emersi nella revisione della letteratura, è stato sviluppato un caso studio con l'obiettivo di applicare alcune delle misure di SNA maggiormente utilizzate negli studi analizzati. Lo scopo della parte sperimentale è quello di descrivere il dataset considerato e di verificare se le interpretazioni e le osservazioni riportate nella letteratura possano emergere in un contesto differente rispetto agli studi originali. Dunque il caso studio viene utilizzato come una sorta di validazione qualitativa delle misure individuate durante la literature review, osservando se le stesse metriche risultino efficaci nell'analisi della struttura della rete, nell'identificazione di nodi centrali o comunità, e nell'interpretazione di fenomeni biologici ed ecologici. Questo approccio permette di creare un collegamento diretto tra la revisione della letteratura e la parte sperimentale della tesi, utilizzando il caso studio come applicazione pratica delle metodologie emerse dagli studi analizzati.

5.1 Specie e dataset esaminati

Il dataset scelto in questo studio è stato trovato tramite l'**ICON**(Index of Complex Networks) dell'Università del Colorado [3], che fornisce un indice comprensivo di reti riguardanti vari domini scientifici. I dati sono stati

successivamente recuperati dal repository pubblico "Penguins of Kyoto" su BitBucket [4].

Il dataset contiene le osservazioni raccolte sulla colonia di pinguini africani che vivono nell'acquario di Kyoto, in Giappone. Come suggerisce il nome, il **pinguino africano** (*Spheniscus demersus*) in natura vive nell'area lungo la costa dell'Africa sud-occidentale, è un predatore subacqueo, caratterizzato da un comportamento fortemente sociale nei confronti dei propri simili.

Purtroppo negli ultimi decenni la sua popolazione totale è in forte declino (con una popolazione residua inferiore a 20'000 individui secondo stime recenti), per minacce come lo sfruttamento storico (raccolta non sostenibile delle uova), l'inquinamento da prodotti petrolchimici e la pesca commerciale. Attualmente è classificata come una delle specie più a rischio estinzione, con il livello "**Critically Endangered**" sulla Red List dell'IUCN [6]. Inoltre, secondo il Green Status [7], che fornisce indicazioni sull'impatto delle azioni di conservazione e sul potenziale di recupero della specie, questa è classificata come **Largely Depleted**, ovvero caratterizzata da una popolazione fortemente ridotta rispetto al passato **ma con un potenziale di recupero medio**. Di conseguenza, comprendere le dinamiche sociali di questa specie può contribuire a identificare individui chiave o configurazioni relazionali rilevanti per la stabilità del gruppo, con possibili implicazioni per strategie di conservazione e gestione. Nel 2015, nella colonia di Bird Island, condizioni di foraggiamento favorevoli hanno portato alla nascita di un numero maggiore di pulcini maschi rispetto alle femmine. Inoltre, i pulcini maschi mostravano tassi di crescita e massa al momento dell'involto più elevati, con una maggiore sopravvivenza post-involto rispetto alle femmine. Questa disparità, unita alla maggiore mortalità femminile negli adulti, potrebbe portare a un rapporto sfavorevole tra i sessi, suggerendo la necessità di strategie di conservazione mirate a incrementare la popolazione femminile [29].

Ogni anno la gestione dell'acquario compila un diagramma di flusso illustrato della colonia [5] che contiene tutte le informazioni sulle relazioni tra i pinguini, e il dataset scelto è una digitalizzazione della versione del 2020. Il

dataset documenta le loro interazioni sociali all'interno di un ambiente controllato, e questo ciò lo rende una risorsa ideale per analizzare le **reti sociali animali in condizioni semi-artificiali**.

5.1.1 Struttura del dataset

Il repository contiene diversi file, ciascuno rappresentante un layer specifico di interazione sociale. Il file "Penguins of Kyoto - Metadata.csv" include le informazioni descrittive associate a ciascun individuo, come nome, sesso e una breve descrizione fisica o comportamentale (ad esempio: "Kujou, F, slow eater"). Questi dati costituiscono gli attributi dei nodi nella rete. Sono inoltre presenti diversi file CSV strutturati come matrici di adiacenza, che descrivono differenti tipologie di relazioni sociali, tra cui Couples, Exes, Complicated, Friends, Enemies e Family. Tali relazioni includono sia legami positivi (ad esempio amicizia o coppia) sia negativi (come rivalità o conflitto). Il dataset comprende anche file di metadati relativi agli archi, che forniscono informazioni contestuali sulle singole interazioni (ad esempio: "Ino, Takakura, always on underwater dates"), arricchendo ulteriormente la descrizione delle relazioni. Infine, è disponibile una serie di file in formato .gexf che rappresentano direttamente i grafi per ciascun tipo di relazione, includendo sia i nodi sia le connessioni con i relativi attributi. I file .gexf sono stati utilizzati come input primario per la costruzione e la visualizzazione della rete, in quanto contengono già la struttura relazionale completa. I file .csv sono stati invece impiegati per integrare informazioni descrittive aggiuntive. Nel complesso, il dataset si configura come una struttura multilivello, in cui le diverse tipologie di interazione sono rappresentate da grafi distinti successivamente integrati in un'unica rete.

5.1.2 Collezione e preprocessing

Tutti i dati sono in formato digitale e accessibili pubblicamente, quindi non è stata necessaria nessuna digitalizzazione o trascrizione manuale. Tut-

tavia, è stato effettuato un processo di preprocessing e integrazione dei dati, necessario per rendere coerenti e analizzabili le diverse fonti informative. Il preprocessing ha incluso le seguenti operazioni:

- Pulizia dei nomi degli individui, tramite rimozione di spazi superflui e normalizzazione delle stringhe per garantire la corretta corrispondenza tra nodi nei diversi file.
- Integrazione dei metadati, mediante associazione del genere a ciascun nodo della rete a partire dal file CSV, così da arricchire la struttura del grafo con attributi nodali.
- Verifica della completezza dei dati, controllando la presenza dell'attributo "Gender" per tutti i nodi e identificando eventuali valori mancanti.

Dopo il preprocessing si è proceduto alla costruzione di un multigrafo diretto, in cui sono state combinate le diverse reti relazionali provenienti dai file GEXF e i metadati provenienti dai file CSV. Questi due livelli sono stati integrati all'interno di un'unica struttura di rete utilizzando la libreria NetworkX. Ogni tipo di relazione è stato mantenuto come attributo dell'arco, permettendo la coesistenza di più relazioni tra gli stessi individui.

Questo processo ha permesso di ottenere una rete unica, coerente e completamente arricchita con attributi, adatta alle successive analisi strutturali e di community detection.

5.1.3 Strumenti utilizzati

Per gestire e analizzare i dati, è stato utilizzato un repository Git per salvare gli script Python di analisi e i risultati durante lo studio. Tutte le analisi sono state condotte in Python usando dei notebook Jupyter come ambiente di sviluppo. Le principali librerie utilizzate includono:

- **Pandas** per manipolazione dei dati, unione e preprocessing dei file CSV
- **Matplotlib** per visualizzazione grafica di misure e proprietà della rete

- **NetworkX** per caricare, visualizzare e calcolare misure e metriche della rete come grado, centralità, e community.

5.2 Visualizzazione della rete

La rete sociale della comunità dei pinguini è rappresentata come un grafo multilivello, diretto, non bipartito e non pesato, strutturato come segue:

- **59 nodi:** ogni nodo corrisponde ad un singolo pinguino, colorato in base all'attributo del sesso
- **139 archi:** gli archi rappresentano le relazioni e associazioni sociali osservate tra i pinguini, colorati in base al tipo di relazione. Tutti gli archi sono diretti, rappresentando sia le connessioni mutuali che le interazioni direzionali.

I tipi di relazione descritti dagli archi sono i seguenti:

Relazione	Colore	Spiegazione
Couples	rosso	relazioni romantiche di coppia
Exes	blu	coppie precedenti
Complicated	viola	dinamiche di coppia non stabili
Family	grigio	legami di parentela
Friends	arancione	legami di amicizia
Enemy	ciano	dinamiche di antagonismo

Tabella 5.1: Tipi di connessione nel grafo

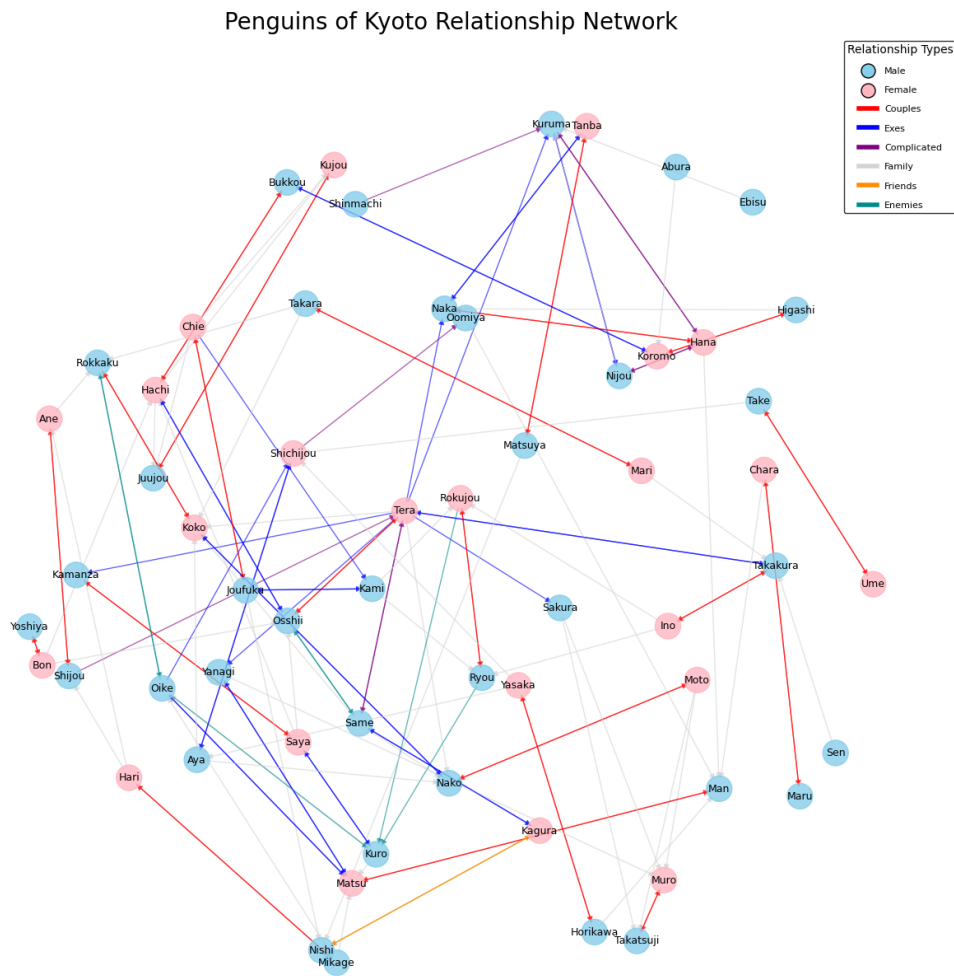


Figura 5.1: Rete sociale dei pinguini di Kyoto

5.3 Metodologia per interpretazione e analisi dei dati

Sono disponibili diverse opzioni quando si sceglie una rappresentazione concettuale di una rete sociale. Anche per lo stesso insieme di dati è possibile rappresentare i dati di interazione o associazione in modi diversi, il

che significa che le decisioni sul miglior approccio da utilizzare dovrebbero dipendere prima di tutto dalle domande di ricerca di interesse e in secondo luogo da eventuali limitazioni intrinseche del dataset analizzato.

In questa sezione si illustrano l'approccio e i metodi impiegati per l'interpretazione dei dati e il calcolo delle misure individuate in letteratura e applicate al dataset selezionato, con l'obiettivo di valutarne la validità e analizzarne empiricamente i risultati nel capitolo 6.

Il dataset dei pinguini di Kyoto è stato costruito a partire da osservazioni etologiche quotidiane effettuate dal personale dell'acquario. Gli individui sono identificati tramite marcature visive (fasce colorate sulle ali), consentendo un monitoraggio continuo delle interazioni sociali. Le relazioni tra individui non sono state rilevate tramite strumenti automatici, ma estratte a partire da osservazioni comportamentali in tempo reale. In particolare, la definizione dei legami sociali si basa sull'osservazione di comportamenti affiliativi come prossimità frequente, interazioni sociali non riproduttive (quali grooming reciproco, bonding, nesting, wing-flapping), oltre a dinamiche relazionali più complesse come cambi di partner, presenza di partner multipli e comportamenti di corteggiamento non stabile. Sono state inoltre considerate interazioni antagonistiche, tra cui aggressione, competizione ed evitamento, insieme alle relazioni familiari derivate dalla genealogia degli individui.

Le categorie relazionali estratte includono legami affiliativi (coppie, amicizie), antagonisti (nemici), dinamici (ex partner, relazioni instabili) e familiari. Tali categorie riflettono una classificazione qualitativa, dato che gli archi rappresentano **relazioni associative** più che interazioni singole, quindi la rete non rappresenta interazioni grezze ma una trasformazione semantica del comportamento già interpretata.

In generale, le **associazioni** sono simmetriche, ma in molti casi le interazioni non lo sono [40](ad esempio, l'individuo A ha effettuato grooming verso l'individuo B 10 volte, mentre B ha effettuato grooming verso A solo due volte).

Tuttavia, nella fonte originale non è esplicitamente definito come sono

state scelte le direzioni degli archi nelle interazioni asimmetriche e per ogni tipo di relazione, e i metadati associati agli archi non sono sempre esplicativi a riguardo. Di conseguenza, la direzione non può essere interpretata come una misura standardizzata ma appare piuttosto come un elemento non formalmente definito e potenzialmente arbitrario all'interno del dataset.

Di conseguenza, per la maggior parte delle seguenti misure e dove non specificato, gli archi sono stati trattati come non diretti, dando più importanza alle associazioni tra individui che alle interazioni, al fine di evitare interpretazioni arbitrarie della direzionalità. Dunque sono state considerate sia una rappresentazione non diretta della rete, utile per studiare la struttura complessiva e la coesione del gruppo, sia una versione diretta, per analizzare in modo esplorativo la direzionalità delle interazioni dove utile.

5.4 Struttura

Grado

Una delle misure più semplici da analizzare è il grado di ogni nodo, che riflette il livello complessivo di interazione associata con ogni individuo. In questo caso, i nodi sono stati ordinati dal grado più alto al più basso per chiarezza: i risultati ottenuti mostrano che il pinguino con il **grado più alto** ha un valore di **11**, mentre il **grado più basso** è **1**, con un **grado medio** di **3.36**.

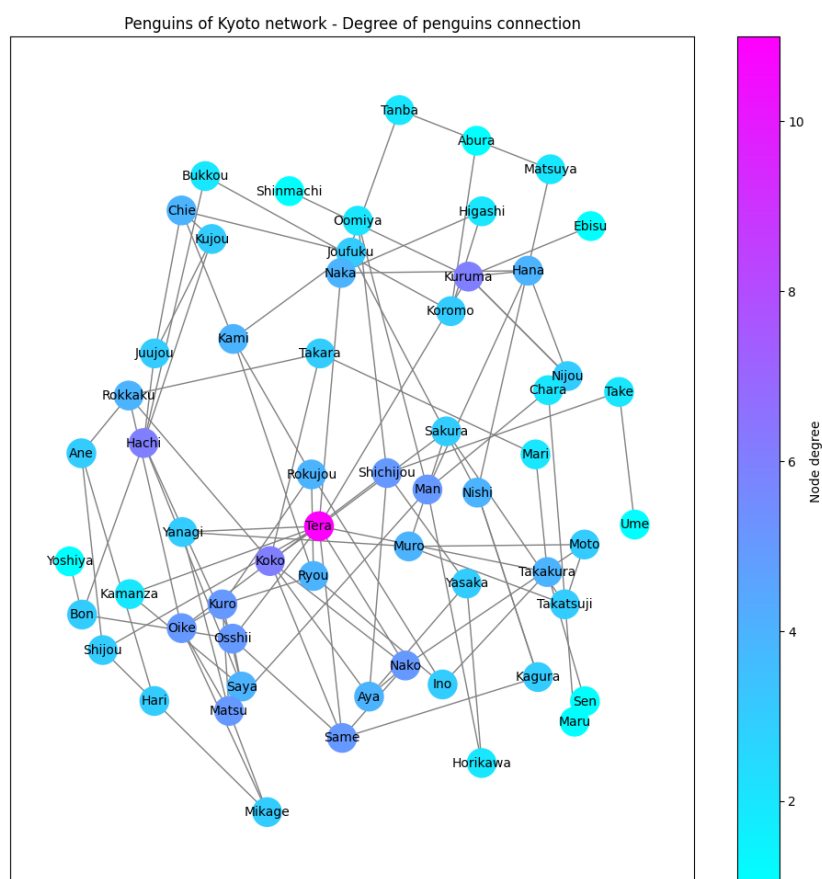


Figura 5.2: Gradi dei nodi

Nodo	Valore
(F) Tera	11
(M) Kuruma	6
(F) Hachi	6
(F) Koko	6
(M) Same	5
(F) Shichijou	5
(M) Nako	5
(M) Osshii	5
(F) Matsu	5
(M) Man	5

Tabella 5.2: Top 10 nodi per grado

Usando la rete diretta, ogni pinguino ha due valori di grado separati: l'**indegree**, che rappresenta il numero di connessioni in entrata, e l'**outdegree** per le connessioni in uscita.

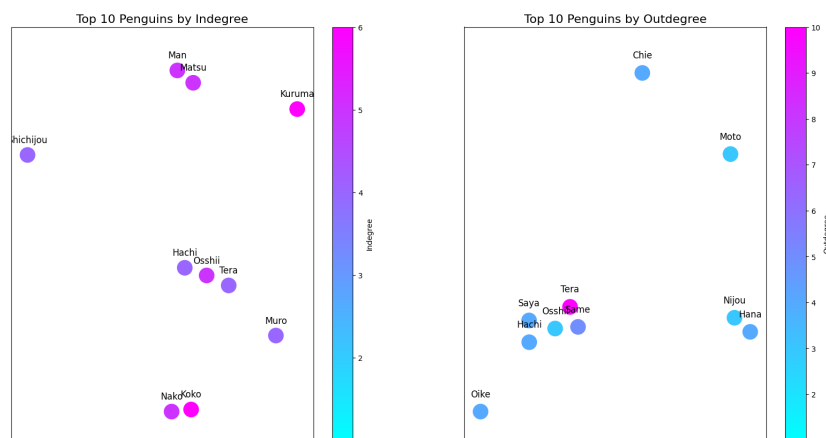


Figura 5.3: Indegree e outdegree dei nodi

Indegree		Outdegree	
Nodo	Valore	Nodo	Valore
(M) Kuruma	6	(F) Tera	10
(F) Koko	6	(M) Same	5
(M) Nako	5	(F) Hana	4
(M) Osshii	5	(F) Saya	4
(F) Matsu	5	(F) Hachi	4
(M) Man	5	(F) Chie	4
(F) Tera	4	(M) Oike	4
(F) Shichijou	4	(M) Nijou	3
(F) Muro	4	(F) Moto	3
(F) Hachi	4	(F) Osshii	3

Tabella 5.3: Top 10 nodi per indegree e outdegree

Connettività

Per valutare la **connettività** complessiva e la compattezza strutturale della rete sociale, sono state esaminate tre misure chiave: la lunghezza del cammino medio, il diametro e la densità di rete.

La **lunghezza del cammino medio (Average Path Length o APL)** rappresenta il numero medio di passaggi richiesti per spostarsi da un individuo a un altro seguendo i percorsi più corti. In questa rete, l'APL è di **3.75**, dunque in media una qualsiasi coppia di pinguini è separata da quasi 4 connessioni. Questo riflette una struttura in cui la maggior parte degli individui può essere raggiunta tramite percorsi di comunicazione corti.

Il **diametro**, definito come il più lungo tra i cammini minimi tra qualsiasi coppia di nodi, è pari a **9**. Questo indica che anche i pinguini più distanti nella colonia possono essere collegati attraverso un massimo di nove associazioni intermedie. Insieme alla lunghezza media dei cammini (APL), ciò conferma ulteriormente che la rete è strutturalmente compatta e ben connessa a livello globale.

Infine, la **densità della rete**, calcolata come la proporzione degli archi osservati rispetto a tutte le possibili connessioni, è pari a **0,0578**. La misura è stata calcolata sulla versione non diretta e semplificata della rete, nella quale le relazioni multiple e reciproche tra le stesse coppie di individui sono state aggregate. Questo significa che solo circa il **6%** di tutti i legami potenziali è effettivamente presente. Sebbene la struttura globale sia compatta in termini di lunghezza dei cammini, il numero complessivo di connessioni per individuo rimane relativamente basso, suggerendo che i pinguini mantengono relazioni sociali selettive piuttosto che esaustive.

Misura	Valore
Average Path Length	3.75
Diametro	9
Densità	0,0578

Tabella 5.4: Misure di connettività nella rete dei pinguini

5.5 Centralità

Le misure di centralità quantificano quanto ogni pinguino sia strutturalmente importante all'interno della rete e aiutano a descrivere i diversi ruoli sociali che gli individui possono assumere nella colonia.

Degree, closeness e betweenness centrality

La **degree centrality** si basa sul numero di legami diretti che un individuo mantiene. I pinguini con valori di grado più elevati hanno maggiori opportunità sociali e di diffusione dell'informazione.

La **closeness centrality** riflette quanto efficientemente un pinguino può raggiungere tutti gli altri nella rete, sulla base dei cammini minimi. Gli individui con alta closeness possono influenzare o accedere rapidamente al

gruppo, anche senza avere molte relazioni dirette. Ciò indica che diversi pinguini occupano posizioni strategicamente centrali, da cui informazioni o comportamenti possono diffondersi rapidamente all'interno della colonia.

La **betweenness centrality** misura quanto spesso un individuo agisca da intermediario tra gli altri. I pinguini con alta betweenness collegano diverse parti della colonia e sono importanti per mantenere la coesione globale. La loro posizione suggerisce che funzionano come **ponti strutturali**: collegano aree della rete che altrimenti sarebbero più distanti, e la loro presenza facilita una comunicazione efficiente e l'integrazione del gruppo. Agiscono come broker poiché si trovano frequentemente sui cammini minimi che connettono diverse parti della rete. La loro rimozione comporterebbe probabilmente un aumento delle distanze nei cammini o addirittura la frammentazione del grafo, indicando che il flusso di informazione nella colonia dipende in parte da pochi intermediari chiave.

I valori più alti sono stati osservati per gli individui riportati in tabella:

Degree centrality		Closeness centrality		Betweenness centrality	
Nodo	Valore	Nodo	Valore	Nodo	Valore
(F) Tera	0.1897	(F) Tera	0.4085	(F) Tera	0.4117
(M) Kuruma	0.1034	(M) Same	0.3452	(M) Naka	0.1450
(F) Hachi	0.1034	(F) Koko	0.3452	(M) Osshii	0.1353
(F) Koko	0.1034	(M) Osshii	0.3392	(M) Man	0.1332
(M) Same	0.0862	(M) Yanagi	0.3392	(M) Kuro	0.1308

Tabella 5.5: Misure di degree, closeness e betweenness centrality

Eigenvector e load centrality

La **eigenvector centrality** permette di identificare gli individui più influenti nella colonia non solo in base al numero di connessioni, ma soprattutto in base all'**importanza dei loro vicini**. Le figure più centrali includono Tera (0.4869), di gran lunga l'individuo più influente, seguita da Koko (0.3393),

Same (0.3212) e Nako (0.3130). Questi pinguini occupano aree della rete circondate da altri nodi strutturalmente importanti. Esistono **casi interessanti** come Nako o Aya (0.1753) che, pur non rientrando tra gli individui principali secondo altre misure di centralità, ottengono valori di eigenvector relativamente elevati perché connessi a vicini altamente influenti. Questo è un pattern comune nelle reti sociali animali, dove il prestigio può derivare più dalla qualità che dalla quantità dei legami sociali.

La **load centrality** misura quanto “traffico” passa attraverso un individuo quando informazioni o interazioni scorrono lungo i cammini minimi della rete. È quindi una misura di intermediazione simile alla betweenness, ma pone maggiore enfasi sulla redistribuzione del flusso attraverso **percorsi alternativi**. In termini biologici, i pinguini con alta load centrality agiscono come importanti canali per interazioni sociali indirette, coordinamento e potenziale trasferimento di informazioni nella colonia. I valori più alti si osservano per Tera (0.4017), Naka (0.1428), Man (0.1375), Kuro (0.1349) e Osshii (0.1318). Questo gruppo **coincide** in larga parte con gli individui principali nella betweenness centrality, confermando che questi pinguini operano come intermediari chiave che collegano diverse parti della colonia.

Tera emerge nuovamente come principale broker strutturale, assorbendo e redistribuendo una parte significativa del flusso della rete, mentre Naka e Man svolgono ruoli complementari nel collegare sottogruppi periferici o semi-indipendenti. Alcuni individui, come Hachi (0.1270) e Matsu (0.1144), mostrano valori di load moderati: non dominano la struttura globale ma fungono comunque da canali secondari attraverso cui le interazioni passano frequentemente. Al contrario, una larga parte della colonia presenta valori bassi, evidenziando una netta distinzione tra individui strutturalmente centrali e quelli con ruoli più localizzati o periferici.

I valori più alti sono stati osservati per gli individui riportati in tabella:

Eigenvector centrality		Load centrality	
Nodo	Valore	Nodo	Valore
(F) Tera	0.4869	(F) Tera	0.4017
(F) Koko	0.3393	(M) Naka	0.1428
(M) Same	0.3212	(M) Man	0.1375
(M) Nako	0.3130	(M) Kuro	0.1349
(M) Osshii	0.2545	(M) Osshii	0.1318
(M) Aya	0.1753	(F) Hachi	0.1270
(M) Yanagi	0.1523	(F) Matsu	0.1144
(M) Kuruma	0.1516	(M) Kuruma	0.1026
(M) Sakura	0.1471	(F) Shichijou	0.0988
(M) Naka	0.1404	(M) Takakura	0.0974

Tabella 5.6: Misure di eigenvector e load centrality

5.6 Comunità

Reciprocità

La **reciprocità** è stata calcolata collassando il multi-grafo originale in sotto-grafi diretti per ogni tipo di relazione, poiché la presenza di archi multipli tra gli stessi nodi altererebbe la misura e la reciprocità non è definita per i multi-grafi diretti. Questo garantisce che i valori ottenuti riflettano correttamente i pattern di direzionalità propri di ciascun tipo di relazione. L'analisi della reciprocità tra i diversi tipi di relazione evidenzia pattern comportamentali distinti all'interno della rete diretta. Le relazioni Couples e Friends risultano completamente reciproche ($r = 1.000$), indicando legami fortemente mutuali ed equilibrati: quando si forma una coppia o un'amicizia, la relazione è sempre ricambiata. Anche le relazioni Exes e Complicated mostrano livelli elevati di reciprocità (rispettivamente $r = 0.774$ e $r = 0.667$), suggerendo che legami passati o ambigui mantengono comunque una componente di riconoscimento reciproco. Al contrario, la categoria Enemies presenta una

reciprocità più bassa ($r = 0.571$), in parte a causa di individui come Kuro che hanno attaccato altri individui, generando interazioni ostili non bilanciate. Infine, le relazioni Family mostrano reciprocità nulla ($r = 0.000$), probabilmente perché i legami familiari sono codificati in modo direzionale nel dataset (ad esempio “genitore $\rightarrow$ figlio”) senza un arco inverso corrispondente. Nel complesso, queste differenze evidenziano come ogni tipo di relazione segua dinamiche direzionali specifiche, coerenti con il suo significato semantico.

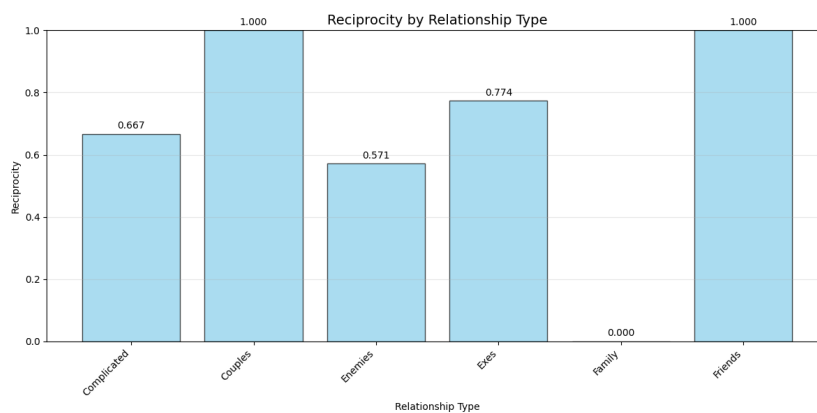


Figura 5.4: Reciprocità per tipo di relazione

Omofilia

L’analisi dell’**omofilia** basata sul genere, effettuata con la rete diretta, rivela pattern distinti tra i diversi tipi di relazione. Le relazioni di tipo Enemies mostrano il livello più alto di omofilia (0.80), indicando che le interazioni ostili avvengono prevalentemente tra pinguini dello stesso sesso, suggerendo dinamiche di competizione, territorialità o dominanza che emergono più frequentemente tra maschi. Le relazioni familiari presentano un livello moderato di omofilia (0.50). Le coppie genitore–figlio possono infatti essere sia dello stesso sesso (ad esempio padre–figlio, madre–figlia) sia di sesso opposto (padre–figlia, madre–figlio). Il dataset contiene una distribuzione approssimativamente bilanciata di queste combinazioni, per cui il valore di omofilia tende naturalmente ad attestarsi intorno a 0.50. Al contrario, le relazioni

Complicated (0.17) ed Exes (0.10) mostrano una bassa omofilia, indicando che queste interazioni avvengono prevalentemente tra pinguini di genere diverso, coerentemente con l'idea che molti di questi legami ambigui o passati nascano tra coppie maschio-femmina. Le relazioni Couples presentano omofilia nulla, evidenziando esclusivamente la presenza di coppie eterosessuali. La categoria Friends mostra anch'essa omofilia nulla, ma in questo caso il risultato è semplicemente una conseguenza della struttura del dataset: la rete contiene un solo arco di amicizia, Nishi $\rightarrow$ Kagura, che collega un maschio a una femmina. Pertanto, il valore di omofilia pari a zero riflette questo caso specifico più che un pattern generale. Nel complesso, questi risultati evidenziano come il genere influenzi in modo diverso i vari tipi di relazione: i **legami romantici e di amicizia** risultano essere **cross-gender** in questo dataset, le **interazioni antagonistiche** sono fortemente **same-gender**, mentre i legami familiari riflettono una combinazione bilanciata di coppie genitore-figlio dello stesso sesso e di sesso opposto.

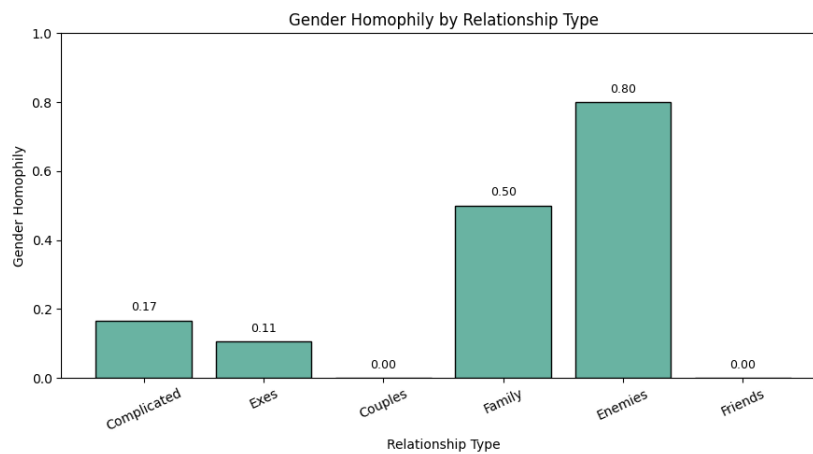


Figura 5.5: Omofilia per tipo di relazione

Transitività e clustering

La struttura locale della rete evidenzia la presenza di 22 triangoli e una **transitività globale** pari a **0.2171**, indicando un livello moderato di chiusura triadica all'interno della colonia. In termini pratici, ciò significa che,

quando due pinguini sono entrambi collegati a un terzo individuo, esiste una probabilità del 21% che siano collegati anche tra loro, formando triangoli di associazioni reciproche.

La presenza di tali triangoli suggerisce l'esistenza di piccoli sottogruppi socialmente coesi, pur in assenza di una struttura fortemente clusterizzata a livello globale. Dal punto di vista comportamentale, riflette la tendenza dei pinguini a instaurare relazioni selettive e relativamente stabili all'interno di cerchie limitate, mentre la rete complessiva rimane relativamente aperta e non completamente interconnessa.

Il **coefficiente di clustering** locale risulta invece pari a **0.0541**, evidenziando una coesione locale generalmente bassa attorno ai singoli nodi. La differenza tra clustering medio e transitività globale suggerisce che la formazione di triangoli non sia distribuita uniformemente nella rete, ma concentrata in specifiche aree o sottogruppi sociali.

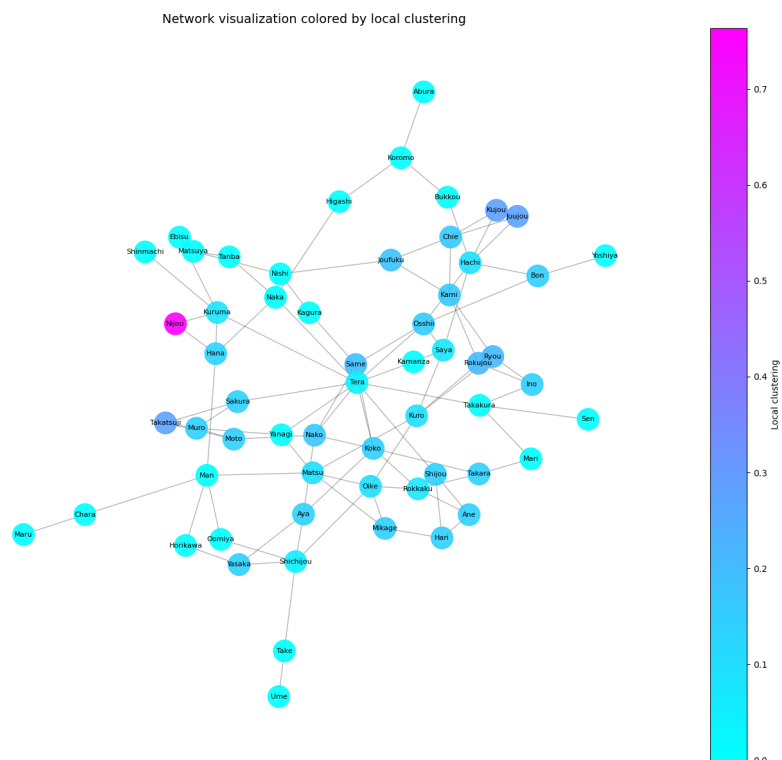


Figura 5.6: Clustering

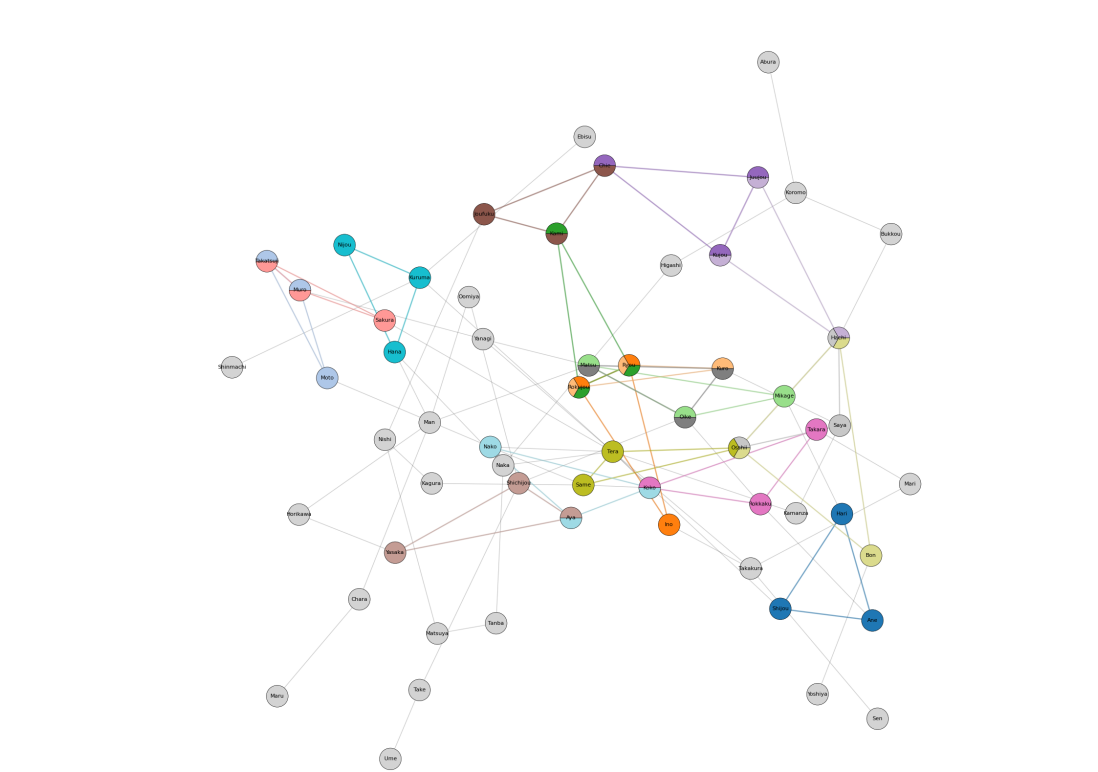
Cliques

Anche le misure di **cliquishness** evidenziano una bassa coesione locale complessiva: il valore medio è **0.0740**, la variante extended ego è 0.2398 e la versione normalizzata per il grado è 0.0233. Nonostante ciò, alcuni individui si distinguono per una forte coesione locale.

Per la cliquishness media, il valore più alto è osservato per Nijou (0.79), seguito da Sakura (0.37) e da un piccolo gruppo di individui attorno a 0.25 (Moto, Takara, Ino).

Per la extended ego cliquishness, Ume e Maru raggiungono i valori più elevati (0.77), nonostante abbiano relativamente poche connessioni.

L'analisi delle **clique** ne individua 18 di dimensione pari a 3, ma solo una di dimensione pari a 4, indicando che i sottogruppi coesi rimangono di piccole dimensioni. Le clique massimali sono 64, mentre i nodi presenti in più di una clique sono invece 15.



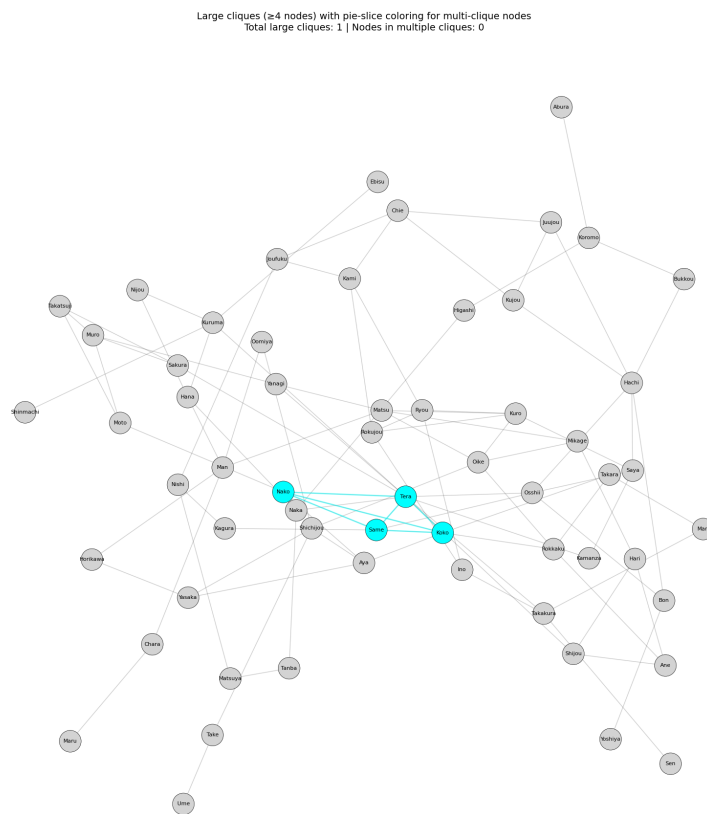


Figura 5.8: Cliques da 4

K-core

In modo coerente, il **massimo k-core** ottenuto è $k = 3$, il che evidenzia un nucleo densamente connesso piuttosto limitato.



Figura 5.9: K-core da 3

Componenti

La rete ha una **singola componente connessa**, ovvero tutti i pinguini fanno parte della stessa struttura sociale senza individui isolati o sottogruppi disconnessi. Ciò riflette la natura coesiva dell'ambiente dell'acquario, dove tutti i pinguini condividono lo stesso spazio fisico e possono interagire liberamente.

Comunità di Louvain

A scala mesoscopica, l'**algoritmo di Louvain** individua **8 comunità** con una discreta **modularità di 0.6**, indicando un'organizzazione modulare. Le dimensioni delle comunità variano da gruppi da 4 nodi strettamente connessi

con densità di 0.7 a gruppi più grandi di 7–8 nodi con densità comprese tra 0.25 e 0.5. La rete appare frammentata in cluster ben definiti con coesione interna eterogenea, dove nuclei locali densi coesistono con una connettività globale generalmente sparsa.

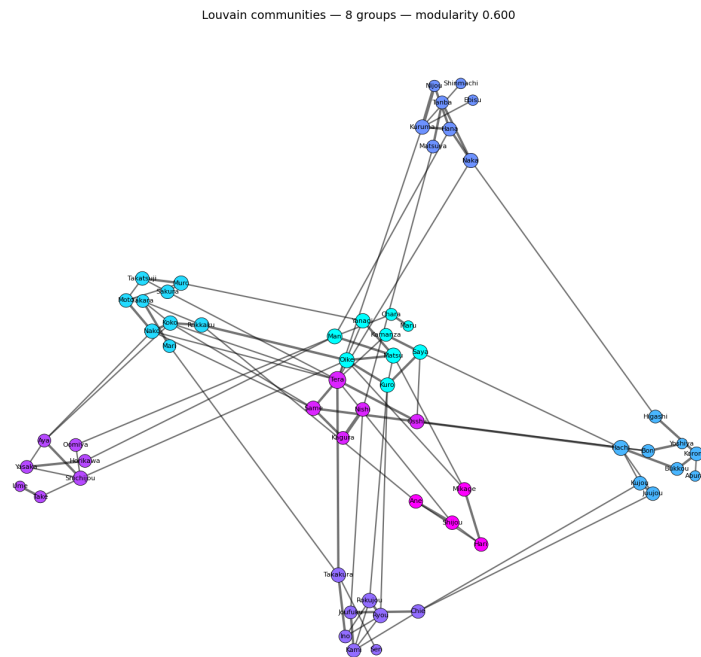


Figura 5.10: Comunità individuate dall'algoritmo di Louvain

Capitolo 6

Valutazione dei risultati e interpretazioni

Questo capitolo è dedicato alla valutazione empirica e qualitativa dei risultati ottenuti dal caso di studio. Dopo aver descritto e calcolato le misure di SNA sul dataset, l'obiettivo è interpretarne il significato alla luce della letteratura esaminata.

Verranno discusse le evidenze emerse sulla comunità studiata evidenziandone struttura, dinamiche relazionali e possibili implicazioni per il welfare e la conservazione. Si valuterà quali misure risultano informative e applicabili al contesto analizzato, e verranno esaminate le diverse interpretazioni delle misure dalla comunità scientifica, verificando quali risultano maggiormente coerenti con i risultati osservati e proponendo letture alternative dove necessario.

6.1 Note su validità, affidabilità e limiti interpretativi

La **validità** del caso di studio può essere considerata **moderata**, poiché il dataset deriva da osservazioni di animali in un ambiente controllato e non in habitat naturale. Sebbene i dati siano basati su individui reali e sulle

loro interazioni sociali osservate, la rete rappresenta un **ecosistema sociale semi-artificiale**: il comportamento degli individui può infatti essere influenzato dallo spazio limitato, dalla composizione stabile del gruppo e dalla gestione umana di alimentazione, riproduzione e condizioni ambientali. Gli animali in cattività, vivendo in un contesto in cui bisogni fondamentali come protezione dai predatori, disponibilità di cibo e presenza di rifugi sono già garantiti, possono percepire in modo diverso i benefici derivanti dall'interazione sociale con specifici membri del gruppo; di conseguenza la struttura della rete può differire da quella osservata in individui in natura [31]. Pacheco e Madden mostrano infatti che, nei suricati, le reti sociali in cattività differiscono per struttura globale, posizione degli individui e pattern di associazione, anche in relazione a fattori quali dimensione del gruppo, spazio disponibile e impossibilità di dispersione.

Questa prospettiva è rilevante per il nostro caso di studio: le misure calcolate devono essere interpretate come descrizione della **struttura sociale reale di questa specifica colonia** all'interno dell'acquario, e non come rappresentazione generale dell'organizzazione sociale delle popolazioni di pinguini in natura. Di conseguenza, la **generalizzabilità ecologica rimane limitata**.

Nonostante tali limiti, il contesto controllato consente un'osservazione sistematica e precisa delle interazioni tra individui, che può ridurre alcuni bias osservativi e fornire dati utili e più controllati per lo studio di dinamiche sociali [17]. Inoltre, come sottolineato da Rose e Croft, la Social Network Analysis può supportare decisioni gestionali negli zoo e nei programmi di conservazione, aiutando a individuare legami preferenziali, individui centrali, sottogruppi, possibili fonti di conflitto e pattern rilevanti per il welfare [28]. Nel caso dei pinguini, questa prospettiva è applicabile in forma esplorativa: le misure permettono di identificare individui strutturalmente rilevanti e relazioni potenzialmente significative, ma senza dati aggiuntivi non consentono di trarre conclusioni definitive su benessere, stress, uso dello spazio o accesso alle risorse. Le conoscenze ottenute attraverso questi studi possono

comunque contribuire all'identificazione di strategie di intervento, gestione e monitoraggio utili per la conservazione, che possono anche essere rivolte a popolazioni selvatiche purché opportunamente adattate e validate.

Una limitazione importante riguarda inoltre la natura statica del dataset. Snijders et al. evidenziano l'importanza delle analisi temporali per valutare stabilità, resilienza e cambiamenti della struttura sociale nel tempo [14]. Nel caso di Kyoto le misure calcolate descrivono la struttura osservata, ma non permettono di analizzare dinamiche temporali, processi di integrazione o risposte a eventi stressanti.

Dal punto di vista dell'**affidabilità**, lo studio garantisce un elevato livello di **riproducibilità e trasparenza**. Le analisi sono state eseguite tramite script Python documentati e versionati mediante un repository Git, consentendo la tracciabilità dell'intero processo analitico. Inoltre, il dataset e il codice utilizzato sono disponibili pubblicamente, permettendo ad altri ricercatori di replicare le analisi, verificare i risultati ottenuti ed estendere lo studio con ulteriori metriche o approcci metodologici.

6.2 Risultati del caso di studio

Questa sezione sintetizza le principali evidenze emerse dall'analisi del caso di studio, concentrandosi su ciò che le misure calcolate suggeriscono riguardo all'organizzazione sociale, alle dinamiche relazionali e alla struttura complessiva della colonia di pinguini di Kyoto.

Le misure di connettività descrivono una rete globalmente connessa ma poco densa. La presenza di una singola componente indica che tutti gli individui appartengono alla stessa struttura sociale, mentre la densità pari a 0.0578 mostra che solo una piccola parte delle connessioni potenzialmente possibili è effettivamente presente. Al tempo stesso, la lunghezza media dei cammini pari a 3.75 e il diametro pari a 9 suggeriscono che gli individui, pur mantenendo relazioni selettive, rimangono inseriti in una struttura complessivamente navigabile e capace di collegare l'intero gruppo.

Dal punto di vista individuale, l'analisi del grado evidenzia una distribuzione eterogenea delle connessioni. Tera emerge come l'individuo maggiormente connesso, con un grado pari a 11, valore nettamente superiore al grado medio della rete, pari a 3.36. Altri individui, come Kuruma, Hachi, Koko, Same, Shichijou, Nako, Osshii, Matsu e Man, presentano valori superiori alla media, ma nessuno raggiunge il livello di connessione osservato per Tera. La distinzione tra indegree e outdegree permette inoltre di evidenziare differenze nella direzione delle relazioni. Tera presenta il valore più elevato di outdegree, suggerendo una maggiore tendenza a instaurare relazioni in uscita, mentre Kuruma e Koko registrano i valori massimi di indegree, risultando tra gli individui più frequentemente raggiunti dagli altri. Questo indica che la posizione sociale di un individuo dipende anche dalla direzione delle interazioni.

Le misure di centralità confermano la presenza di un numero ristretto di individui strutturalmente rilevanti. Tera risulta centrale anche secondo closeness, betweenness, eigenvector e load centrality. Altri individui, tra cui Koko, Same, Naka, Osshii, Man e Kuro, assumono ruoli importanti in specifiche metriche. Ciò suggerisce che la centralità non sia distribuita ma concentrata attorno ad alcuni soggetti che occupano posizioni differenti: alcuni risultano importanti per il numero di legami, altri per la capacità di collegare porzioni diverse della rete o per la connessione con individui a loro volta centrali. Nel complesso, circa **10 pinguini** (15–20% della colonia) ricoprono **ruoli centrali** nella struttura della rete, mentre i restanti 49 individui occupano posizioni più periferiche o localmente limitate.

Le misure di reciprocità e omofilia mostrano che le diverse categorie relazionali seguono logiche differenti. Le relazioni positive, come *Couples* e *Friends*, risultano completamente reciproche, mentre le relazioni antagonistiche presentano minore reciprocità. Anche l'omofilia varia in base al tipo di relazione: le interazioni *Enemies* mostrano una forte omofilia di genere, mentre le relazioni romantiche o passate, come *Couples*, *Exes* e *Complicated*, risultano prevalentemente cross-gender. Ciò suggerisce che le relazioni

positive, negative e ambigue non possano essere interpretate come parte di un'unica dinamica sociale omogenea.

Infine, le misure di transitività, clustering, clique, k-core e comunità evidenziano una struttura articolata. La presenza di 22 triangoli e una transitività pari a 0.217 indicano una moderata tendenza alla chiusura triadica, mentre il basso coefficiente medio di clustering suggerisce che tale coesione non sia distribuita uniformemente tra tutti gli individui. Le numerose clique di dimensione tre, l'unica clique di dimensione quattro e il massimo k-core pari a 3 indicano che i sottogruppi più coesi rimangono di dimensioni ridotte.

La rete non appare frammentata in componenti isolate, ma presenta sottogruppi locali riconoscibili, confermati dalla presenza di otto comunità individuate tramite l'algoritmo di Louvain e da una modularità pari a 0.6. La colonia può quindi essere descritta come una rete globalmente connessa ma localmente differenziata, caratterizzata da relazioni selettive, sottogruppi interni e alcuni individui particolarmente centrali.

6.3 Interpretazioni e confronto con la letteratura

A partire dalla sezione precedente, è possibile confrontare i risultati con le interpretazioni attribuite alle misure di rete nella letteratura esaminata. L'obiettivo non è confrontare direttamente i valori numerici con quelli riportati in altri studi, poiché specie, contesti osservativi e modalità di raccolta dei dati sono differenti, ma valutare in che misura le interpretazioni proposte nei paper siano applicabili al dataset analizzato. Il caso di studio viene quindi usato come test interpretativo delle misure di SNA.

È importante considerare le differenze tra i dataset: alcuni studi analizzano piccoli gruppi attraverso osservazioni comportamentali dirette e reti separate per tipo di interazione, mentre il dataset di Kyoto descrive una rete più ampia, statica e categoriale, costruita a partire da relazioni note di natura diversa. Di conseguenza, la stessa misura può assumere significati differenti

a seconda della dimensione della rete, del tipo di legami considerati e della presenza o assenza di informazioni temporali e comportamentali.

Per questo motivo, le interpretazioni proposte dagli autori vengono considerate in modo critico, valutando se siano effettivamente trasferibili al dataset dei pinguini di Kyoto o se richiedano letture alternative. Per rendere più esplicito il confronto, la Tabella 6.1 sintetizza le principali differenze tra i diversi casi di studio.

Studio	Dataset e contesto	Tipo di rete	Differenze principali rispetto al caso di studio
Penguins of Kyoto	Pinguini in ambiente controllato/acquario. 59 individui.	Rete statica e categoriale basata su relazioni note: <i>Couples</i> , <i>Friends</i> , <i>Family</i> , <i>Enemies</i> , <i>Exes</i> , <i>Complicated</i> .	-
Martínez Rubio et al. [17]	Lemuri frontebianca in ambiente gestito. 11 individui.	Reti comportamentali separate, basate su osservazioni dirette.	Dataset più piccolo, ma più dettagliato; le misure sono riferite a comportamenti specifici, non a categorie relazionali aggregate.
Baciadonna et al. [8]	Pinguini africani in colonia ex-situ. 19 individui, con introduzione di gruppi di 6 e poi 10 nuovi pinguini.	Reti di associazione/prossimità con confronto prima e dopo gli inserimenti.	Caso simile per specie e contesto, ma con una dimensione temporale aggiuntiva.
Norman et al. [25]	Lemuri neri in zoo. Gruppo familiare di 4 individui.	Reti dirette di interazioni affiliative e aggressive osservate.	Dataset molto piccolo, ma con informazioni più precise su direzione, contesto e tipo di interazione.
Pacheco e Madden [31]	Suricati in cattività e in natura. 15 gruppi in cattività, 113 individui, confrontati con gruppi selvatici.	Reti separate per diversi comportamenti e confronto tra cattività e natura.	A differenza del dataset di Kyoto, confronta più gruppi e permette di valutare l'effetto del contesto ecologico sulle misure.

Tabella 6.1: Confronto tra il dataset di Kyoto e i dataset considerati nella letteratura.

6.3.1 Connettività, coesione e struttura modulare

Una prima area di confronto riguarda il significato attribuito a densità, componenti, comunità e misure di coesione locale. In diversi lavori, la densità viene utilizzata come indicatore del livello di coesione sociale. Ad esempio, nello studio sui lemuri frontebianca in cattività, le reti affiliative presentano valori elevati di densità e l'assenza di sottogruppi distinti viene interpretata come segnale di una struttura sociale coesa e relativamente stabile [17]. In modo simile, nel lavoro di Snijders et al. la densità, le componenti e la struttura delle comunità vengono considerate misure utili per valutare se una popolazione stia diventando più integrata o, al contrario, più frammentata [14].

Nel caso della colonia di pinguini di Kyoto, questa interpretazione trova solo un'**applicazione parziale**. La rete presenta infatti una densità bassa (0.0578), indicando che solo una piccola parte delle connessioni potenzialmente possibili è effettivamente presente. Questo risultato non rispecchia una coesione diffusa tra tutti gli individui, tuttavia, la presenza di una singola componente connessa mostra che **la colonia non è frammentata** in gruppi isolati.

La differenza nella dimensione dei dataset rende il confronto diretto dei valori di densità poco immediato: in gruppi piccoli, come quello dei lemuri, una bassa densità potrebbe indicare più chiaramente una ridotta coesione affiliativa, mentre in una rete più ampia e con più tipi di associazione come quella di Kyoto una densità bassa può riflettere anche la maggiore numerosità degli individui e la conseguente **selettività dei legami**. Questa lettura è coerente anche con il paper sui pinguini africani in ambiente ex-situ, dove le associazioni sociali risultano legate a **preferenze specifiche**, familiarità e storia relazionale [8].

Le otto comunità individuate tramite Louvain, con modularità pari a 0.6, indicano una differenziazione interna della rete, lettura confermata anche dalle misure di clustering, clique e k-core: esistono sottogruppi più coesi, seppur di dimensioni ridotte. Dunque la bassa densità, la presenza di clique

ridotte e la modularità relativamente elevata suggeriscono che le relazioni tendano a concentrarsi in sottogruppi locali.

L'interpretazione più coerente è quindi quella di una rete differenziata ma integrata a livello globale, nonostante la bassa densità.

6.3.2 Degree, centralità e ruoli strutturali

In letteratura, il degree viene spesso interpretato come indicatore del livello di coinvolgimento diretto di un individuo nella rete: valori elevati suggeriscono maggiore attività sociale, interazione ed esposizione a processi di trasmissione [22, 28]. Questa interpretazione risulta in parte coerente con il caso di studio, soprattutto per Tera, che presenta il grado più elevato della rete. La distinzione tra indegree e outdegree aggiunge inoltre un ulteriore livello interpretativo: Tera mostra il valore più elevato di outdegree, mentre Kuruma e Koko presentano i valori massimi di indegree, indicando che la posizione sociale dipende anche dalla direzione delle interazioni.

Tuttavia, come sottolinea Brent, il degree non è sufficiente da solo per descrivere il ruolo sociale complessivo di un individuo: due nodi con lo stesso numero di legami possono infatti occupare posizioni molto diverse, ad esempio restando interni a un sottogruppo oppure collegando parti differenti della rete.

Per questo motivo, le misure di centralità indiretta permettono di arricchire l'interpretazione. Closeness, betweenness, eigenvector e load centrality descrivono la posizione occupata dagli individui nella struttura complessiva della rete. Tera emerge come individuo centrale sia per degree sia per le misure di centralità, suggerendo un ruolo particolarmente rilevante nella connettività della colonia. La betweenness centrality è particolarmente utile per individuare possibili individui ponte (o broker), cioè soggetti collocati sui cammini che connettono aree diverse della rete [22]. In questo caso Tera emerge come principale intermediario, seguito da Naka, Osshii, Man e Kuro. Una lettura simile è proposta da Snijders et al., che collegano la betweenness al potenziale flusso di informazioni, comportamenti o patogeni nella rete [14].

La load centrality rafforza questa lettura, evidenziando i nodi attraverso cui passa una parte rilevante del flusso potenziale lungo i cammini della rete. La sovrapposizione tra individui con alta betweenness e alta load centrality suggerisce la presenza di alcuni pinguini con un ruolo di intermediazione più marcato.

Tuttavia, nel caso di Kyoto questa interpretazione deve rimanere prudente. Poiché il dataset non registra frequenza, durata o intensità delle interazioni, né include dati su fitness, trasmissione o apprendimento sociale, la centralità osservata deve essere letta come una proprietà strutturale della rete delle relazioni note. Di conseguenza, è possibile identificare individui potenzialmente importanti per il collegamento tra parti diverse della rete, ma non dimostrare una maggiore attività sociale nel tempo, veri processi di diffusione o effettivi ruoli da super-spreaders.

6.3.3 Sesso, centralità e attributi individuali

Un ulteriore confronto riguarda la distribuzione della centralità rispetto al sesso degli individui. Nel paper sui lemuri frontebianca, il nucleo centrale delle reti affiliative è formato principalmente da femmine e cuccioli, mentre i maschi adulti risultano più periferici, pur con alcune eccezioni in specifiche reti come quella di grooming [17]. Questa interpretazione è interessante perché mostra che individui femminili possono occupare posizioni centrali anche in specie e ambienti non caratterizzati da una rigida dominanza femminile.

Nel caso dei pinguini di Kyoto, alcuni individui femminili occupano effettivamente posizioni molto rilevanti. Tera è il caso più evidente, risultando centrale in quasi tutte le metriche considerate; anche Koko e Hachi compaiono tra gli individui più connessi o centrali in alcune classifiche. Tuttavia, **la centralità non appare esclusivamente femminile**: diversi maschi, tra cui Same, Naka, Osshii, Man e Kuro, assumono ruoli importanti in specifiche misure, soprattutto quelle legate all'intermediazione.

Per questo motivo, l'interpretazione proposta nello studio sui lemuri può essere applicata **solo parzialmente**. Il dataset dei pinguini non supporta

una lettura della rete come struttura complessivamente centrata sul genere femminile. Una lettura più prudente è che la centralità sia distribuita in modo selettivo tra pochi individui di entrambi i sessi, con Tera come soggetto particolarmente rilevante.

Questa cautela è coerente anche con il paper sui pinguini africani, in cui **il sesso non risulta necessariamente il principale predittore delle associazioni sociali**, mentre fattori come familiarità e storia di introduzione nella colonia possono avere un ruolo più importante [8]. Nel dataset di Kyoto non sono disponibili informazioni temporali sull'introduzione degli individui, ma la presenza di categorie come *Couples*, *Exes*, *Complicated* e *Family* suggerisce che la **storia relazionale possa essere una dimensione rilevante per comprendere la struttura della rete**.

6.3.4 Tipologie di relazione, reciprocità e omofilia

Molti paper sottolineano l'importanza di distinguere reti costruite su tipi diversi di relazione. Gli studi sui lemuri, sui suricati e sugli animali in zoo mostrano che reti affiliative, agonistiche, competitive o di prossimità possono presentare strutture differenti e non dovrebbero essere interpretate come equivalenti [25, 31, 28]. Questa lettura è particolarmente importante nel caso della colonia di Kyoto, dato che la rete complessiva include relazioni di significato molto diverso.

L'analisi della reciprocità mostra che le relazioni positive, come *Couples* e *Friends*, sono completamente reciproche, mentre la categoria *Enemies* presenta una reciprocità inferiore. Questo risultato è coerente con il paper sui lemuri neri, in cui le interazioni aggressive risultano solo parzialmente reciproche, a differenza delle interazioni affiliative, che sono maggiormente bilanciate [25]. La convergenza suggerisce che le relazioni positive tendano a essere più mutuali, mentre quelle antagonistiche possono essere più asimmetriche e direzionali.

Tuttavia, Rose e Croft invitano a non interpretare automaticamente l'aggressività come un indicatore negativo. Le interazioni aggressive possono

infatti contribuire alla definizione di gerarchie o alla regolazione della struttura sociale; diventano rilevanti dal punto di vista gestionale solo quando sono eccessive, ricorrenti o concentrate su specifici individui [28]. Anche in questo caso la differenza tra dataset è rilevante: sebbene nel caso dei pinguini di Kyoto la categoria *Enemies* mostri reciprocità più bassa e forte omofilia di genere, suggerendo la presenza di dinamiche conflittuali localizzate, ciò non consente di stabilire se tali relazioni siano problematiche dal punto di vista del welfare, poiché mancano dati su frequenza, intensità, durata e contesto delle interazioni.

L'analisi dell'omofilia evidenzia inoltre che il genere non struttura tutte le relazioni nello stesso modo. Le interazioni antagonistiche mostrano un'elevata omofilia, mentre categorie come *Couples*, *Exes* e *Complicated* sono prevalentemente cross-gender. Questa interpretazione trova riscontro nel paper di Pacheco e Madden sui suricati, in cui sesso e status influenzano le reti in modo differente a seconda del tipo di interazione considerato [31].

Il risultato del caso di Kyoto suggerisce quindi che il genere sia una variabile il cui effetto cambia in base alla categoria relazionale, o in altre parole, il genere assume significati diversi a seconda della relazione considerata. Questa lettura è coerente anche con il paper sui pinguini africani, dove oltre al sesso, le associazioni sociali dipendono anche da familiarità e storia relazionale [8]. Dunque la rete non è organizzata per genere in modo monodimensionale. In questo senso, l'omofilia risulta una misura utile per distinguere le logiche relazionali associate a categorie specifiche.

In questo caso la SNA può essere considerata uno strumento esplorativo utile per individuare possibili aree di attenzione. Per uno studio più approfondito sul welfare, l'interpretazione delle relazioni antagonistiche richiederebbe dati aggiuntivi, come osservazioni comportamentali nel tempo, indicatori di fitness o informazioni contestuali sulle aggressioni.

6.4 Sintesi di risultati e interpretazioni

Nel complesso, il confronto con la letteratura mostra che le interpretazioni associate alle misure di SNA non si applicano tutte allo stesso modo al caso di studio. Alcune risultano coerenti con i risultati ottenuti, altre sono applicabili solo parzialmente, mentre altre ancora devono essere considerate con cautela a causa dei limiti del dataset.

L'interpretazione della densità come indicatore di coesione sociale risulta applicabile solo in parte. La bassa densità non permette infatti di descrivere la colonia come un gruppo omogeneamente coeso; tuttavia, la presenza di una singola componente connessa esclude una frammentazione completa. La lettura è quindi quella di una rete globalmente connessa e integrata ma localmente differenziata, caratterizzata da **relazioni selettive** e modularità interna. Questo perché una bassa densità in una rete piccola e affiliativa è più direttamente interpretabile come bassa coesione, mentre una bassa densità in una rete ampia, categoriale e mista può invece indicare selettività relazionale, modularità e differenze tra tipi di legame.

Le interpretazioni relative alla centralità risultano invece più direttamente applicabili. Il degree permette di identificare gli individui più coinvolti nelle relazioni dirette, mentre betweenness, closeness, eigenvector e load centrality consentono di distinguere ruoli strutturali più complessi. In questo senso, Tera emerge come individuo centrale sotto più dimensioni, mentre altri soggetti, come Naka, Osshii, Man e Kuro, assumono ruoli più specifici di collegamento tra parti diverse della rete.

Anche le interpretazioni basate sulla distinzione tra tipologie di relazione risultano coerenti con il caso di studio. Le relazioni positive appaiono più reciproche, mentre quelle antagonistiche sono più asimmetriche e caratterizzate da maggiore omofilia di genere. Questo conferma che legami affiliativi, familiari, antagonisti e ambigui non dovrebbero essere interpretati come equivalenti, ma come dimensioni diverse della struttura sociale della colonia.

Al contrario, le letture più legate a welfare, stress, fitness, trasmissione, gestione conservativa o dinamiche temporali possono essere richiamate solo

in forma esplorativa. Il dataset permette infatti di descrivere la struttura della rete e individuare possibili individui centrali o broker, ma non consente di dimostrare effetti biologici, gestionali o comportamentali diretti. Per tali interpretazioni sarebbero necessari dati biologici, longitudinali e contestuali aggiuntivi.

La Tabella 6.2 riassume il confronto tra le principali interpretazioni emerse dalla letteratura e i risultati ottenuti nel caso di studio, evidenziando per ciascun tema quali letture risultano coerenti, quali si applicano solo parzialmente e quali richiedono maggiore cautela.

Tabella 6.2: Sintesi del confronto tra caso di studio e letteratura.

Temi e misure	Interpretazione dalla letteratura	Risultato nel caso di studio	Esito del confronto e lettura critica
Connettività, coesione e struttura modulare	Misure usate per valutare coesione sociale e frammentazione. Densità elevata indica coesione diffusa. Bassa densità indica frammentazione della rete	Densità bassa, singola componente connessa. 8 comunità Louvain, clique piccole e massimo k-core pari a 3	Applicazione parziale, la singola componente esclude una frammentazione completa. Comunità indicano rete globalmente integrata ma localmente differenziata. Bassa densità in reti ampie e differenziate suggerisce selettività dei legami
Degree, centralità e ruoli strutturali	Degree indica coinvolgimento diretto nella rete, centralità indirette permettono di trovare individui strutturalmente rilevanti e importanti per flussi di trasmissioni	Tera ha il degree più elevato ed emerge anche secondo tutte le centralità. Naka, Oshii, Man rilevanti nell'intermediazione. Tera ha il massimo outdegree, mentre Kuruma e Koko hanno i massimi indegree	Applicabili sul piano strutturale. Il dataset permette di trovare individui centrali e possibili broker, ma non di dimostrare maggiore attività sociale nel tempo, processi effettivi di diffusione o ruoli di super-spreaders
Sesso, centralità e attributi individuali	Alcuni studi mostrano che individui femminili possono occupare posizioni centrali nelle reti affiliative anche in assenza di dominanza femminile, ma altri evidenziano che il sesso non spiega sempre da solo la struttura sociale	Alcune femmine, in particolare Tera, Koko e Hachi, occupano posizioni rilevanti. Tuttavia, anche maschi come Same, Naka, Oshii, Man e Kuro risultano importanti in specifiche misure, soprattutto di intermediazione	L'interpretazione di una centralità prevalentemente femminile si applica solo parzialmente . Il caso Kyoto suggerisce una centralità distribuita in modo selettivo tra pochi individui di entrambi i sessi. Familiarità e storia relazionale potrebbero avere più importanza

Continua nella pagina successiva

Temi e misure	Interpretazione dalla letteratura	Risultato nel caso di studio	Esito del confronto e lettura critica
Tipologie di relazione, reciprocità e omofilia	Reti affiliative, agonistiche, familiari o di prossimità possono avere strutture e interpretazioni diverse . Relazioni affiliative tendono a essere più reciproche, mentre quelle antagonistiche più asimmetriche.	<i>Couples e Friends</i> completamente reciproche, mentre <i>Enemies</i> presenta reciprocità inferiore. <i>Enemies</i> mostra forte omofilia di genere, mentre <i>Couples, Exes</i> e <i>Complicated</i> risultano prevalentemente cross-gender	L'interpretazione è coerente con la letteratura: le categorie relazionali seguono logiche diverse e non formano un'unica dinamica sociale omogenea. Tuttavia <i>Enemies</i> non basta per dimostrare aggressività ricorrente o welfare compromesso
Cattività, welfare e gestione conservativa	SNA può supportare la gestione di gruppi in cattività, individuando legami preferenziali, individui centrali, sottogruppi e possibili aree di attenzione per welfare e conservazione ex-situ	Il dataset Kyoto descrive una colonia specifica in ambiente controllato e permette di individuare soggetti centrali, sottogruppi e relazioni antagonistiche	L'applicazione è esplorativa . Le misure possono suggerire aree di attenzione gestionale, ma non consentono diagnosi su stress, benessere compromesso, uso dello spazio, accesso alle risorse o effetti gestionali diretti
Dinamiche temporali e inserimenti	Studi longitudinali permettono di valutare cambiamenti della rete, stabilità dei legami, processi di integrazione e impatto dell'introduzione di nuovi individui	Il dataset Kyoto è statico e rappresenta una fotografia delle relazioni note. Non contiene reti confrontabili prima e dopo eventuali inserimenti	Interpretazione non applicabile con il dataset attuale. L'analisi degli inserimenti sarebbe rilevante per welfare e conservazione ex-situ, ma richiederebbe dati organizzati in più momenti temporali confrontabili

Capitolo 7

Conclusioni

Il lavoro svolto ha avuto l'obiettivo di analizzare l'uso della Social Network Analysis nello studio delle reti sociali animali, con particolare attenzione al modo in cui le misure di rete possono contribuire alla descrizione della struttura sociale, all'individuazione di ruoli individuali e alla formulazione di interpretazioni biologiche, ecologiche e gestionali.

A partire dalla revisione della letteratura, sono state individuate le principali rappresentazioni di rete utilizzate in ambito animale, le misure più ricorrenti e le interpretazioni che la letteratura associa a tali misure. Successivamente, queste conoscenze sono state applicate al caso di studio della colonia di pinguini africani dell'acquario di Kyoto, con lo scopo di verificare in che misura le metriche e le interpretazioni emerse dalla letteratura potessero essere trasferite a un dataset diverso per specie, contesto e struttura dei dati.

Lo studio ha permesso di rispondere alle domande di ricerca poste all'inizio del lavoro.

Alla prima domanda, “*Quali sono le caratteristiche strutturali delle reti sociali animali ed ecologiche?*”, non emerge una configurazione unica valida per tutti i contesti. Le reti animali possono rappresentare relazioni molto diverse tra loro, come associazioni affiliative, interazioni antagonistiche, legami familiari, relazioni di prossimità, dinamiche di dominanza

o processi di trasmissione. Di conseguenza, la struttura della rete dipende dal comportamento osservato, dalla specie studiata, dal contesto ecologico o gestionale e dal modo in cui i dati vengono raccolti e trasformati in archi. Le reti possono quindi essere dirette o non dirette, pesate o non pesate, statiche o dinamiche, monolivello o multilivello. Questa varietà conferma che la SNA è uno strumento flessibile, ma anche che ogni risultato deve essere interpretato in relazione alla specifica rappresentazione adottata.

Alla seconda domanda, “*Quali misure di Social Network Analysis vengono utilizzate per analizzare tali reti?*”, la revisione ha mostrato che le metriche possono essere organizzate su più livelli. Le misure globali, come densità, componenti, lunghezza media dei cammini, diametro e modularità, permettono di descrivere la coesione, la frammentazione e l’organizzazione complessiva della rete. Le misure individuali, come degree, indegree, outdegree, closeness, betweenness, eigenvector e load centrality, consentono invece di individuare soggetti maggiormente connessi, centrali o rilevanti nel collegare parti diverse della rete. Infine, misure come clustering, transitività, clique, k-core, reciprocità e omofilia permettono di analizzare sottogruppi, relazioni mutuali e associazioni tra struttura sociale e attributi individuali.

In relazione alla terza domanda, “*In che modo tali misure contribuiscono all’interpretazione biologica, ecologica e di conservazione?*”, il lavoro evidenzia che le metriche di rete possono fornire indicazioni utili, ma non automaticamente conclusive, poiché le interpretazioni dipendono fortemente dalla natura e dalla qualità dei dati disponibili. Il caso di studio mostra in particolare i limiti di un’interpretazione basata esclusivamente sulle proprietà strutturali della rete. Le letture relative a centralità, modularità, reciprocità e differenziazione tra tipi di relazione risultano coerenti e informative. Al contrario, interpretazioni più forti riguardanti welfare, stress, fitness, trasmissione di comportamenti o patogeni e gestione conservativa devono rimanere esplorative, poiché il dataset non contiene informazioni sufficienti per verificarle direttamente. La SNA deve quindi essere considerata uno strumento utile per produrre evidenze strutturali e formulare ipotesi

interpretative, da integrare con dati comportamentali, biologici, ecologici e temporali.

In conclusione, il lavoro mostra che la SNA rappresenta uno strumento efficace per descrivere e interpretare le reti sociali animali, purché venga applicata in modo critico e coerente con la natura dei dati. Le misure di rete permettono di individuare strutture, sottogruppi e ruoli individuali che sarebbero difficili da cogliere con approcci descrittivi tradizionali. Tuttavia, il loro valore interpretativo dipende dalla possibilità di collegare i risultati strutturali a dati comportamentali, ecologici e biologici più dettagliati. La SNA non sostituisce quindi l'osservazione etologica o l'analisi biologica, ma può integrarle, offrendo una prospettiva quantitativa utile per comprendere la complessità delle relazioni sociali animali e per orientare future analisi in ambito di welfare e conservazione.

Lavori futuri

Il lavoro svolto potrebbe essere esteso in diverse direzioni. Una prima possibilità riguarda l'inclusione di dati più recenti sulla colonia, ad esempio quelli relativi al 2026, disponibili attraverso i diagrammi aggiornati dell'acquario di Kyoto. Questo permetterebbe di trasformare l'analisi da statica a longitudinale, osservando eventuali cambiamenti nella struttura della rete, nella posizione degli individui centrali, nella formazione delle comunità e nella stabilità delle relazioni nel tempo.

Un secondo sviluppo riguarda l'approfondimento dei diversi tipi di relazione presenti nel dataset. In particolare, sarebbe utile analizzare separatamente le reti affiliative e antagonistiche, confrontando misure come densità, coesione, reciprocità, omofilia e centralità. Questo consentirebbe di distinguere meglio il ruolo degli individui nelle relazioni positive e negative, valutando ad esempio se i soggetti centrali nella rete complessiva siano centrali anche nelle interazioni di tipo conflittuale o affiliativo.

Dal punto di vista metodologico, futuri lavori potrebbero introdurre test statistici più robusti, come tecniche di permutazione, bootstrapping e null

models, al fine di valutare la significatività dei pattern osservati. Sarebbe inoltre utile analizzare le correlazioni tra misure di centralità, poiché metriche diverse possono descrivere aspetti simili della posizione strutturale degli individui.

Infine, un'ulteriore estensione potrebbe riguardare simulazioni di rimozione di nodi, come key removal e random removal, per valutare la robustezza della rete e il contributo degli individui più centrali al mantenimento della connettività complessiva. Tuttavia, per collegare questi risultati a implicazioni gestionali, di welfare o conservazione, sarebbe necessario integrare il dataset con dati osservativi più dettagliati, informazioni temporali e indicatori biologici o comportamentali aggiuntivi.

Bibliografia

- [1] Angela Carrera-Rivera et al. “How-to conduct a systematic literature review: A quick guide for computer science research”. In: *MethodsX* 9 (2022), p. 101895. ISSN: 2215-0161. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mex.2022.101895>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215016122002746>.
- [2] Hannah Snyder. “Literature review as a research methodology: An overview and guidelines”. In: *Journal of Business Research* 104 (2019), pp. 333–339. ISSN: 0148-2963. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0148296319304564>.
- [3] Ellen Tucker Aaron Clauset e Matthias Sainz. *The Colorado Index of Complex Networks*. 2016. URL: <https://icon.colorado.edu/networks> (visitato il giorno 24/03/2026).
- [4] Heather Z. Brooks e Michelle Feng. *Penguins of Kyoto Multilayer Network*. 2020. URL: https://bitbucket.org/mhfeng/penguins_of_kyoto/src.
- [5] Kyoto Aquarium. *Social Network Diagram*. 2026. URL: <https://www.kyoto-aquarium.com/special/sokanzu/> (visitato il giorno 24/03/2026).
- [6] BirdLife International. *Spheniscus demersus*. e.T22697810A256021744. The IUCN Red List of Threatened Species. 2024. URL: <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2024-2.RLTS.T22697810A256021744.en> (visitato il giorno 17/04/2026).
- [7] C. Hagen et al. *Spheniscus demersus (Green Status assessment)*. The IUCN Red List of Threatened Species. 2021. URL: <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2024-2.RLTS.T22697810A256021744.en> (visitato il giorno 17/04/2026).
- [8] Luigi Baciadonna et al. “Network social dynamics of an ex-situ colony of African penguins following the introduction of unknown conspecifics”. In: *Applied Animal Behaviour Science* 273 (apr. 2024), p. 106232. ISSN: 01681591. DOI: 10.1016/j.applanim.2024.106232. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168159124000807> (visitato il giorno 10/04/2026).
- [9] DARREN P. CROFT, RICHARD JAMES e JENS KRAUSE. *Exploring Animal Social Networks*. Princeton University Press, 2008. ISBN: 9780691127521. URL: <http://www.jstor.org/stable/j.ctt7sfqv> (visitato il giorno 19/03/2026).
- [10] Tina Wey et al. “Social network analysis of animal behaviour: a promising tool for the study of sociality”. In: *Animal Behaviour* 75.2 (2008), pp. 333–344. ISSN: 0003-3472. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2007.06.020>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003347207004393>.

- [11] Quinn M.R. Webber e Eric Vander Wal. "Trends and perspectives on the use of animal social network analysis in behavioural ecology: a bibliometric approach". In: *Animal Behaviour* 149 (mar. 2019), pp. 77–87. ISSN: 00033472. DOI: 10.1016/j.anbehav.2019.01.010. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0003347219300119> (visitato il giorno 26/03/2026).
- [12] Cooper M. Farr, Sarah E. Reed e Liba Pejchar. "Social Network Analysis Identifies Key Participants in Conservation Development". In: *Environmental Management* 61.5 (mag. 2018), pp. 732–740. ISSN: 0364-152X, 1432-1009. DOI: 10.1007/s00267-018-1017-6. URL: <http://link.springer.com/10.1007/s00267-018-1017-6> (visitato il giorno 26/03/2026).
- [13] Kazushige Yamaki. "Network governance of endangered species conservation: A case study of Rebutia Lady's-Slipper". In: *Journal for Nature Conservation* 24 (apr. 2015), pp. 83–92. ISSN: 16171381. DOI: 10.1016/j.jnc.2014.10.004. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1617138114001113> (visitato il giorno 26/03/2026).
- [14] Lysanne Snijders et al. "Animal Social Network Theory Can Help Wildlife Conservation". In: *Trends in Ecology & Evolution* 32.8 (ago. 2017), pp. 567–577. ISSN: 01695347. DOI: 10.1016/j.tree.2017.05.005. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169534717301301> (visitato il giorno 26/03/2026).
- [15] A. Sánchez-Mercado et al. "Social network analysis reveals specialized trade in an Endangered songbird". In: *Animal Conservation* 23.2 (apr. 2020), pp. 132–144. ISSN: 1367-9430, 1469-1795. DOI: 10.1111/acv.12514. URL: <https://zslpublications.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/acv.12514> (visitato il giorno 26/03/2026).
- [16] Maheshwaran Govender et al. "Mapping conservation conflicts by integrating social network analysis and Q methodology: A sea turtle case from Sri Lanka". In: *Scientific Reports* 15.1 (13 mag. 2025), p. 16658. ISSN: 2045-2322. DOI: 10.1038/s41598-025-99926-5. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-99926-5> (visitato il giorno 26/03/2026).
- [17] Victoria Martínez Rubio et al. "The Social Network of a Group of White-Fronted Lemurs (*Eulemur albifrons*) in Managed Care". In: *International Journal of Primatology* 46.5 (ott. 2025), pp. 960–976. ISSN: 0164-0291, 1573-8604. DOI: 10.1007/s10764-025-00508-z. URL: <https://link.springer.com/10.1007/s10764-025-00508-z> (visitato il giorno 26/03/2026).
- [18] Matthew J. Silk. "Conceptual representations of animal social networks: an overview". In: *Animal Behaviour* 201 (lug. 2023), pp. 157–166. ISSN: 00033472. DOI: 10.1016/j.anbehav.2023.04.017. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0003347223001100> (visitato il giorno 26/03/2026).
- [19] Cristiana Maurella et al. "Social network analysis and risk assessment: An example of introducing an exotic animal disease in Italy". In: *Microbial Risk Analysis* 13 (dic. 2019), p. 100074. ISSN: 23523522. DOI: 10.1016/j.mran.2019.04.001. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352352218300586> (visitato il giorno 26/03/2026).
- [20] Quinn M.R. Webber, David C. Schneider e Eric Vander Wal. "Is less more? A commentary on the practice of 'metric hacking' in animal social network analysis". In: *Animal Behaviour* 168 (ott. 2020), pp. 109–120. ISSN: 00033472. DOI: 10.1016/j.anbehav.2020.08.011. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0003347220302463> (visitato il giorno 26/03/2026).
- [21] Marc Naguib Lysanne Snijders. "Communication in Animal Social Networks". In: *Advances in the Study of Behavior*. Vol. 49. Elsevier, 2017, pp. 297–359. ISBN: 978-0-12-812121-4. DOI: 10.1016/bs.asb.2017.02.004. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0065345417300050> (visitato il giorno 26/03/2026).

- [22] Lauren J.N. Brent. "Friends of friends: are indirect connections in social networks important to animal behaviour?" In: *Animal Behaviour* 103 (mag. 2015), pp. 211–222. ISSN: 00033472. DOI: 10.1016/j.anbehav.2015.01.020. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0003347215000305> (visitato il giorno 26/03/2026).
- [23] Mark Tranmer et al. "Using the relational event model (REM) to investigate the temporal dynamics of animal social networks". In: *Animal Behaviour* 101 (mar. 2015), pp. 99–105. ISSN: 00033472. DOI: 10.1016/j.anbehav.2014.12.005. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0003347214004588> (visitato il giorno 26/03/2026).
- [24] Sebastian Sosa, Cédric Sueur e Ivan Puga-Gonzalez. "Network measures in animal social network analysis: Their strengths, limits, interpretations and uses". In: *Methods in Ecology and Evolution* 12.1 (gen. 2021). A cura di Timothée Poisot, pp. 10–21. ISSN: 2041-210X, 2041-210X. DOI: 10.1111/2041-210X.13366. URL: <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/2041-210X.13366> (visitato il giorno 26/03/2026).
- [25] Max Norman et al. "Social Network Analysis as a Tool in the Care and Wellbeing of Zoo Animals: A Case Study of a Family Group of Black Lemurs (*Eulemur macaco*)". In: *Animals* 13.22 (13 nov. 2023), p. 3501. ISSN: 2076-2615. DOI: 10.3390/ani13223501. URL: <https://www.mdpi.com/2076-2615/13/22/3501> (visitato il giorno 26/03/2026).
- [26] Jens Krause, David Lusseau e Richard James. "Animal social networks: an introduction". In: *Behavioral Ecology and Sociobiology* 63.7 (mag. 2009), pp. 967–973. ISSN: 0340-5443, 1432-0762. DOI: 10.1007/s00265-009-0747-0. URL: <http://link.springer.com/10.1007/s00265-009-0747-0> (visitato il giorno 26/03/2026).
- [27] Richard James, Darren P. Croft e Jens Krause. "Potential banana skins in animal social network analysis". In: *Behavioral Ecology and Sociobiology* 63.7 (mag. 2009), pp. 989–997. ISSN: 0340-5443, 1432-0762. DOI: 10.1007/s00265-009-0742-5. URL: <http://link.springer.com/10.1007/s00265-009-0742-5> (visitato il giorno 26/03/2026).
- [28] Pe Rose e Dp Croft. "The potential of Social Network Analysis as a tool for the management of zoo animals". In: *Animal Welfare* 24.2 (mag. 2015), pp. 123–138. ISSN: 0962-7286, 2054-1538. DOI: 10.7120/09627286.24.2.123. URL: https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0962728600006692/type/journal_article (visitato il giorno 26/03/2026).
- [29] Anouk Spelt e Lorient Pichégu. "Sex allocation and sex-specific parental investment in an endangered seabird". In: *Ibis* 159.2 (apr. 2017), pp. 272–284. ISSN: 0019-1019, 1474-919X. DOI: 10.1111/ibi.12457. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ibi.12457> (visitato il giorno 11/05/2026).
- [30] Yongzheng Sun et al. "Networked collective dynamics in animal ecology and cell biology". In: *Physics of Life Reviews* 57 (lug. 2026), pp. 4–60. ISSN: 15710645. DOI: 10.1016/j.plrev.2026.02.003. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1571064526000187> (visitato il giorno 26/03/2026).
- [31] Xareni P. Pacheco e Joah R. Madden. "Does the social network structure of wild animal populations differ from that of animals in captivity?" In: *Behavioural Processes* 190 (set. 2021), p. 104446. ISSN: 03766357. DOI: 10.1016/j.beproc.2021.104446. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0376635721001303> (visitato il giorno 26/03/2026).

- [32] Josh A. Firth. “Considering Complexity: Animal Social Networks and Behavioural Contagions”. In: *Trends in Ecology & Evolution* 35.2 (feb. 2020), pp. 100–104. ISSN: 01695347. DOI: 10.1016/j.tree.2019.10.009. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169534719302988> (visitato il giorno 26/03/2026).
- [33] Darren P Croft, Safi K Darden e Tina W Wey. “Current directions in animal social networks”. In: *Current Opinion in Behavioral Sciences* 12 (dic. 2016), pp. 52–58. ISSN: 23521546. DOI: 10.1016/j.cobeha.2016.09.001. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352154616301619> (visitato il giorno 26/03/2026).
- [34] Andrew Sih et al. “Integrating social networks, animal personalities, movement ecology and parasites: a framework with examples from a lizard”. In: *Animal Behaviour* 136 (feb. 2018), pp. 195–205. ISSN: 00033472. DOI: 10.1016/j.anbehav.2017.09.008. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0003347217302956> (visitato il giorno 26/03/2026).
- [35] Ralf H.J.M. Kurvers et al. “The evolutionary and ecological consequences of animal social networks: emerging issues”. In: *Trends in Ecology & Evolution* 29.6 (giu. 2014), pp. 326–335. ISSN: 01695347. DOI: 10.1016/j.tree.2014.04.002. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169534714000858> (visitato il giorno 26/03/2026).
- [36] Ralf H.J.M. Kurvers et al. “Contrasting context dependence of familiarity and kinship in animal social networks”. In: *Animal Behaviour* 86.5 (nov. 2013), pp. 993–1001. ISSN: 00033472. DOI: 10.1016/j.anbehav.2013.09.001. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0003347213003874> (visitato il giorno 26/03/2026).
- [37] Nikolai W.F. Bode, A. Jamie Wood e Daniel W. Franks. “The impact of social networks on animal collective motion”. In: *Animal Behaviour* 82.1 (lug. 2011), pp. 29–38. ISSN: 00033472. DOI: 10.1016/j.anbehav.2011.04.011. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0003347211001539> (visitato il giorno 26/03/2026).
- [38] Charles Perreault. “A note on reconstructing animal social networks from independent small-group observations”. In: *Animal Behaviour* 80.3 (set. 2010), pp. 551–562. ISSN: 00033472. DOI: 10.1016/j.anbehav.2010.06.020. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0003347210002587> (visitato il giorno 26/03/2026).
- [39] Anna Ilona Roberts e Sam George Bradley Roberts. “How can we use social network analysis to better understand Chimpanzee and Gorilla sociality and communication?” In: *Animal Cognition* 28.1 (14 lug. 2025), p. 58. ISSN: 1435-9456. DOI: 10.1007/s10071-025-01980-z. URL: <https://link.springer.com/10.1007/s10071-025-01980-z> (visitato il giorno 26/03/2026).
- [40] Damien R. Farine e Hal Whitehead. “Constructing, conducting and interpreting animal social network analysis”. In: *Journal of Animal Ecology* 84.5 (set. 2015). A cura di Sonia Altizer, pp. 1144–1163. ISSN: 0021-8790, 1365-2656. DOI: 10.1111/1365-2656.12418. URL: <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1365-2656.12418> (visitato il giorno 26/03/2026).
- [41] Paul Koene e Bert Ipema. “Social Networks and Welfare in Future Animal Management”. In: *Animals* 4.1 (17 mar. 2014), pp. 93–118. ISSN: 2076-2615. DOI: 10.3390/ani4010093. URL: <https://www.mdpi.com/2076-2615/4/1/93> (visitato il giorno 26/03/2026).

Ringraziamenti

Desidero ringraziare innanzitutto mia madre, mio padre e mia sorella, per il sostegno che mi hanno dimostrato durante questo percorso, e per avermi insegnato cosa vuol dire impegnarsi per ciò che si vuole raggiungere.

Ringrazio Aaron e Nino per l'amore incondizionato e per avermi accompagnato silenziosamente (o quasi) in molte giornate di studio.

Ringrazio i miei nonni, i miei zii e i miei cugini, per l'affetto e per aver rappresentato, ciascuno a modo suo, una presenza importante nella mia vita.

Ringrazio i miei amici per le serate e le distrazioni necessarie per ritrovare un po' di spensieratezza.

Ringrazio i miei vecchi colleghi, con cui ho condiviso una parte importante del percorso universitario, tra difficoltà, confronti e soddisfazioni.

Ringrazio la mia terapeuta, per avermi accompagnato e aiutato ad affrontare un periodo complesso, fornendomi strumenti che sono stati importanti anche per riuscire ad arrivare fino a questo traguardo.

Desidero inoltre ringraziare il mio relatore Saverio Giallorenzo, per la disponibilità, il supporto e il tempo dedicato alla realizzazione di questa tesi.