



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI PSICOLOGIA GENERALE

Corso di laurea triennale in
Scienze e tecniche psicologiche
Tesi di laurea triennale

Cognizione numerica in esemplari di poecilia reticulata tramite matching to sample
Numerical cognition through the matching to sample procedure in guppies.

Relatore: Prof. Marco Dadda

Correlatrice: Dott.ssa Gabriela Gjinaj

Laureando: Tommaso Riva

Matricola: 2016218

Anno accademico 2023/2024

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	1
1.1 Cognizione animale.....	1
1.2 Cognizione numerica.....	2
1.3 Scopo dello studio.....	3
2. MATERIALI E METODI.....	5
2.1 Specie.....	5
2.2 Soggetti sperimentali.....	6
2.3 Apparato sperimentale.....	7
2.4 Stimoli.....	8
2.5 Procedura sperimentale.....	8
2.5.1 Familiarizzazione.....	8
2.5.2 Preadattamento.....	9
2.5.3 Training.....	9
3. ANALISI STATISTICHE.....	11
4. RISULTATI.....	12
5. DISCUSSIONE.....	15
Bibliografia.....	17

1. INTRODUZIONE

1.1 Cognizione animale

Lo studio della cognizione animale ha inizio a metà tra '700 e '800 con l'obiettivo di indagare processi come la capacità di pianificazione e la rappresentazione simbolica di stimoli. Ben presto si è evoluta in cognizione comparata che si occupa di analizzare e porre a confronto i meccanismi del ragionamento, della memoria e della percezione negli uomini e negli animali. Nel corso degli anni son stati condotti numerosi studi sugli animali volti anche e soprattutto a capire l'origine evolutiva di abilità cognitive che si presentano simili negli esseri umani. E'importante infatti considerare che diversi animali possiedono e maneggiano concetti anche complessi, necessari per adattarsi all'ambiente circostante in continua evoluzione.

La barriera più grande è indubbiamente data dal fatto che gli animali non sono in grado di riportare le loro esperienze verbali, perciò sono stati realizzati diversi paradigmi utili per indagare le abilità cognitive e il comportamento delle diverse specie, tra questi: il test del labirinto, fondamentale per lo studio della memoria e dell'orientamento spaziale, il condizionamento classico di Pavlov e il condizionamento operante basato sugli studi di Skinner e i test di discriminazione, utilizzati per verificare la capacità di distinguere tra stimoli diversi (colori, forme, suoni...).

Tra gli studi più interessanti nell'ambito della discriminazione degli animali abbiamo lo studio di Von Frisch che dimostra che dopo un breve periodo di abituazione in cui alle api viene messo a disposizione del cibo su un cartoncino blu esse riescono a tornare dall'alveare e trovandosi di fronte ad un cartoncino blu ed uno rosso a scegliere quello rosso a cui erano abituate dimostrando un'ottima capacità di discriminazione cromatica. L'esperimento riportato suggerisce che anche da specie meno evolute, come gli insetti, si possano estrapolare aspetti fondamentali per la comprensione delle capacità cognitive e che il divario fra gli essere umani e le altre specie non è netto come può sembrare (Frisch, 1950).

Nel corso della storia son stati effettuati anche numerosi altri esperimenti su un'ampia varietà di specie partendo dagli scimpanzé (Menzel, 1973), passando dai corvi della Nuova caledonia (Bluff, Weir e Rutz, 2007) per arrivare anche ai pesci (Sovrano e Bisazza, 2009).

1.2 Cognizione numerica

La cognizione numerica per definizione ci consente di elaborare ed utilizzare le quantità, stimare con precisione gli oggetti presenti in un ambiente e facilitare l'utilizzo della memoria oltre ad altri innumerevoli processi che utilizziamo nella vita quotidiana.

Essa si palesa all'uomo nel momento in cui ha bisogno di rispondere ad esigenze principalmente pratiche e concrete come ad esempio la conta del bestiame.

Inizialmente si utilizzava segnare un bastone con delle tacche per tenere il conto, si è poi passati all'utilizzo di nomi che indicassero una quantità per arrivare agli odierni simboli che indicano i numeri, un processo lungo e laborioso che lascia poco spazio all'idea che altre specie siano provviste di questa abilità. In realtà esistono numerosi esempi in letteratura che dimostrano che l'abilità numerica non appartiene esclusivamente all'essere umano. In uno studio (Kawai, Matsuzawa, 2000) è stato dimostrato che un esemplare di scimpanzé ,non solo è in grado di ricordare di ricordare i numeri dallo zero al nove toccando su uno schermo i numeri corretti, ma è capace anche di metterli in sequenza nel momento in cui non gli vengono presentati tutti. Lo studio dimostra che oltre alle capacità mnemoniche nello scimpanzé è presente l'abilità di pianificare l'ordine in cui vanno messi i numeri e solo dopo agire.

Un altro studio a riguardo (Gabor, Gerken, 2014) utilizza il paradigma matching to sample su tre esemplari di Shetland. L'esemplare una volta entrato nella stanza si trova di fronte ad uno schermo dove compare uno stimolo nella parte alta dello schermo e nella parte più bassa uno stimolo identico ed uno confondente (Figura 1), la capacità di discriminazione numerica è evidente nel momento in cui l'esemplare è in grado di schiacciare correttamente il pulsante nonostante il cambiamento di forma e dimensione degli stimoli.

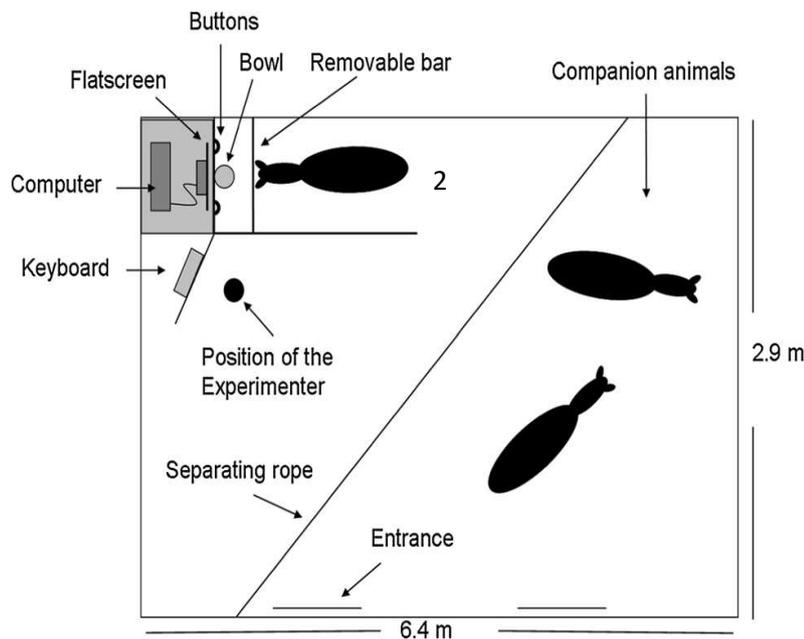


Figura 1 Apparato sperimentale e area d'attesa dove rimangono gli altri esemplari. Lo sperimentatore fornisce la ricompensa in caso di decisione corretta.

Il senso del numero, un'abilità all'apparenza esclusivamente umana, si riscopre quindi necessaria anche agli animali per facilitarne l'adattamento all'ambiente. L'utilità di questa caratteristica per gli animali varia dall'evitare la presenza di predatori, trovare compagni e orientarsi nello spazio e verso il cibo.

1.3 Scopo dello studio

Lo studio si prefigge l'obiettivo di constatare l'effettiva abilità di discriminazione numerica nei pesci. Gli esemplari che son stati sottoposti allo studio son più precisamente *Poecilia reticulata*. La cognizione numerica dei pesci viene indagata attraverso il cosiddetto matching to sample (MTS) simultaneo, un paradigma molto utilizzato nell'addestramento alla discriminazione.

L'animale viene posto di fronte ad uno stimolo principale che presenta un numero variabile di forme geometriche, ai suoi lati, vi è da una parte uno stimolo con lo stesso

numero di forme e dall'altra uno stimolo distruttore che differisce per quantità. Il compito è discriminare fra le due diverse rappresentazioni scegliendo quella identica allo stimolo centrale.

Questo studio è volto perciò a stabilire se l'esemplare di *guppy* possiede sufficienti abilità cognitive complesse per compiere un'adeguata codifica degli stimoli nonostante la presenza di uno stimolo confondente che si pone da ostacolo nella presa di decisione.

2. MATERIALI E METODI

2.1 Specie

I *P. reticulata*, anche noti come *guppy*, sono pesci originari dei fiumi del Venezuela e del Trinidad and Tobago. Il loro nome, *Poecilia Reticulata*, deriva dal greco “poikilos” che significa variegato e “reticulum”, ovvero rete, ciò è dovuto alla loro colorazione variabile e vivace e al tema a rete presente sulle loro squame, particolarmente evidente nei maschi. La colorazione del corpo per ogni individuo è diversa in grado, taglia e posizione e può essere considerata un’arma a doppio taglio, soprattutto per i maschi adulti. Se è vero delle squame più sgargianti e colorate attirano più facilmente le femmine, si deve anche considerare che attirano più facilmente anche i predatori come pesci gatto, aironi o rane.

La loro incredibile capacità di adattamento ne ha permesso la diffusione lungo tutto il globo, basti pensare che ora si possono trovare anche in Italia. Il loro habitat è molto variabile, possono abitare acque non inferiori ai 18° e non superiori ai 28°C e spaziano tra fiumi, laghi e stagni con diversi gradi di salinità.



Figura 2 Esempari di diverso sesso di *P. reticulata*

Le dimensioni della femmina sono leggermente superiori ,tra i 4 e i 7 cm, mentre il maschio raggiunge al massimo i 5 cm, ha però una coda più larga e colorata (Figura 2).

I *guppy* si riproducono durante tutto l'anno, a parte i mesi di Dicembre e Gennaio, con un picco di fertilità a Luglio (Peters, 1859). La gestazione ha una durata che varia tra i 25 e i 30 giorni e da una covata si schiudono circa dai 12 ai 60 avannotti di colore nero o trasparente.

2.2 Soggetti sperimentali

Lo studio è stato effettuato nel dipartimento di psicologia generale dell'università di Padova, all'interno del Laboratorio di Comportamento e Cognizione animale, in esemplari femmina di *P.reticulata* allevati in numerose vasche in cui son presenti anche esemplari maschi.

In natura questi esemplari si nutrono di alghe, larve di zanzare e zooplancton (Lawal, Edokpayi e Osibona, 2012). Nella ricerca sono stati nutriti, la mattina, all'incirca verso le 9:00, con del mangime secco e il pomeriggio, per le 17:00, con nauplii di *Artemia salina*, il tutto con l'ausilio di una pipetta.

Le vasche al cui interno son passati ventisei pesci utilizzati per l'esperimento sono costantemente controllate e dotate di attrezzature apposite per renderle il più verosimile possibile al loro habitat naturale. Il fondo era ricoperto da alghe e ghiaia, una luce fluorescente era posta poco sopra la vasca e un filtro permetteva la pulizia costante dell'ambiente.

La selezione dei soggetti, spostati poi all'interno di vasconi, può essere più complessa dal momento che non risulta sempre semplice riconoscere quando l'esemplare è in gestazione. Inoltre, è importante utilizzare retini adatti alla specie per poterli spostare con accuratezza da una vasca ad un'altra.

2.3 Apparato sperimentale

Dopo aver effettuato la pulizia e il riassetto di tutti i componenti delle vasche utilizzate per l'esperimento (20x32x50cm) e averle riempite con acqua tra i 26 e i 28°C, i soggetti, scelti in base alle dimensioni e all'età, sono stati prelevati dalle vasche comuni e introdotti ognuno in una singola vasca.

Ogni vasca, di forma rettangolare, era composta da sottili lastre di vetro ricoperte da riquadri in polypack (Figura 3). All'interno, poggiati sulle due pareti corte, vi erano dei pannelli bianchi della dimensione della parete dai quali sporgeva, a centro parete, un tubo semicircolare nel quale veniva poi inserita la bacchetta o un braccio di essa. Le altre due pareti, quelle più lunghe, erano anch'esse ricoperte da due pannelli che sporgevano centralmente inglobando il filtro ed uno specchio appoggiato alla parete. La sporgenza formata crea un corridoio che divide la vasca in due stanze facendo così in modo che l'esemplare di *guppy* la prima cosa che vede di fronte a sé nel passaggio da una stanza ad un'altra sia lo stimolo centrale. Il fondo era rivestito da un letto ghiaia.



Figura 3 Apparato sperimentale utilizzato per l'addestramento di un singolo esemplare.

2.4 Stimoli

Per questo esperimento sono stati utilizzati degli stimoli che rappresentano diverse numerosità. Gli stimoli sono otto forme geometriche: stella, cerchio, triangolo, triangolo con la punta verso il basso, x, croce, quadrato e rombo. Queste figure sono stampate su dei quadratini di carta (3x3cm) plastificati e riempite in nero per farle risaltare il più possibile e renderle più visibili sullo sfondo bianco del quadratino. I quadratini venivano inseriti poi nella vasca all'interno di piccole taschine presenti sul fondo delle braccia delle bacchette. Le bacchette adoperate per inserire gli stimoli all'interno della vasca erano formate da tre bracci della stessa lunghezza (33x3,5cm), di cui quello centrale posizionato più in alto per facilitarne l'estrazione dalla vasca. Durante la delicata introduzione della bacchetta all'interno della vasca è importante fare attenzione che i tre bracci siano ben adiacenti al pannello in polypack e che il braccio centrale venga inserito correttamente all'interno della sporgenza cilindrica presente sui lati corti dell'apparato.

2.5 Procedura sperimentale

La procedura sperimentale ha inizio con l'introduzione dei soggetti, accuratamente scelti, all'interno di vasche da training individuale. Da questo momento gli esemplari di *P. reticulata* devono affrontare diverse fasi sperimentali. La prima fase è la familiarizzazione che li accompagna al preadattamento fino alla fase di training.

2.5.1. Familiarizzazione

Questa fase ha lo scopo di far sì che i soggetti si ambientino alla nuova vasca. Ha inizio dal momento in cui occupano per la prima volta l'apparato sperimentale individualmente e la durata di questa fase è di tre giorni. Fino alla fase di preadattamento i soggetti vengono gestiti e nutriti esattamente come accadeva nelle vasche.

2.5.2 Preadattamento

Lo scopo di questa fase è introdurre i soggetti alle bacchette. Si inizia inserendo una bacchetta con un solo braccio all'interno della vasca, alternando frontale-destra (alla sinistra dello sperimentatore), posteriore-sinistra, frontale sinistra (alla destra dello

sperimentatore) e posteriore-destra, lasciandola appoggiata al bordo adiacente alla parete per un breve periodo di tempo. Nel momento in cui il soggetto si avvicina allo stimolo viene rilasciata una piccola quantità di nauplii di *Artemia salina* tramite una pipetta.

Durante questa fase tutte le procedure devono essere svolte con particolare accuratezza per cercare di non colpire la vasca, siccome il movimento dell'acqua potrebbe spaventare i soggetti. In questa fase può capitare che i pesci più spaventati non collaborino restando fermi in un angolo della vasca o fuggendo dall'altro lato dello stimolo ogni volta che viene inserito.

Il preadattamento ha la durata di due giorni e in entrambi i giorni gli esemplari di *P. reticulata* devono sostenere delle prove divise in due sessioni. Le prove, che sono inizialmente otto, aumentano a dodici nel secondo giorno mantenendo però la stessa distanza fra le due sessioni giornaliere (1,5ore).

Alla fine del preadattamento i pesci che hanno interagito di rado con lo stimolo o che non lo hanno fatto proprio vengono reintrodotti nelle vasche dov'erano inizialmente, mentre i restanti esemplari iniziano la fase vera e propria di training.

2.5.3 Training

In questa fase, i sedici soggetti selezionati, vengono introdotti alla bacchetta a tre braccia e ha inizio il compito cognitivo complesso per i pesci. Ora non dovranno più solo avvicinarsi al braccio per ricevere il rinforzo, ma anche effettuare una scelta per non avvicinarsi a quello sbagliato. Il training ha la durata complessiva di nove giorni e ogni giorno i *P. reticulata* devono affrontare dodici prove, distanziate l'un l'altra di non più di dieci minuti e con un intervallo della durata di novanta minuti a metà prove.

Il compito dello sperimentatore, dopo aver inserito gli appositi stimoli nella bacchetta e la bacchetta nella vasca, è quello di attendere e osservare la reazione dei soggetti per poi rinforzarli. Nel momento in cui il pesce supera il corridoio centrale e si avvicina allo stimolo laterale corrispondente a quello centrale, applicando una leggera pressione sulla pipetta viene rilasciato il rinforzo. Nel caso in cui invece dovesse interagire con lo stimolo sbagliato la bacchetta viene estratta immediatamente.

Ad ogni prova corrisponde un confronto di stimoli differente e con il procedere delle prove diventano più complesse. I primi giorni le differenze di numerosità tra i vari stimoli sono più grandi (1vs4, 1vs6, 2vs6), perciò il compito è più semplice. Gli ultimi quattro giorni le prove diventano più complesse, la differenza, sia in quantità che in forma e dimensione, si fa sempre minore, ciò viene fatto per evitare che i soggetti si basino sulla quantità di colore presente nei quadratini piuttosto che sulla numerosità. Gli stimoli più complessi (2vs3, 3vs4) sostituiscono solo alcuni dei confronti precedenti, mentre gli altri rimangono invariati.

La seconda fase ha grande rilevanza nell'esperimento, poiché consente di comprendere al meglio se la risposta del pesce è data in base alla propria capacità discriminativa o da altri fattori.

3. ANALISI STATISTICHE

L'esperimento ha avuto inizio con ventisei soggetti, di questi solo sedici hanno superato la seconda fase (preaddestramento) e tra loro, dodici hanno concluso le nove giornate di addestramento. Dunque, il campione finale che è stato utilizzato per analizzare i dati, è di dodici.

Le analisi sono state condotte utilizzando la proporzione di scelte corrette come variabile dipendente, in particolare l'indice è stato calcolato andando a dividere, per ciascun soggetto, il numero di scelte corretto sul numero totale di prove focalizzandoci sulle prime giornate di test.

Per verificare se a livello di gruppo i soggetti sono stati in grado di distinguere tra le differenti numerosità, è stato condotto un t-test a campione unico. Per indagare se a livello individuale ci fosse stato un apprendimento, è stato condotto anche un test binomiale andando a considerare individualmente la performance di ciascun soggetto.

Infine, per verificare se variabili come tempo, posizione dello stimolo corretto e confronto avessero un'influenza sulla performance complessiva, è stato fatto un modello lineare generalizzato ad effetti misti con distribuzione binomiale (GLMM, funzione 'glmer' del pacchetto R 'lme4'). In particolare, le variabili di interesse sono state inserite come fattori fissi, mentre il codice di ciascun soggetto è stato considerato come fattore random. Successivamente, le variabili sono state analizzate con la funzione 'Anova' del pacchetto R 'car'.

Al fine di condurre le analisi statistiche, è stato utilizzato il programma RStudio (versione 4.4.0) (The R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, <http://www.rproject.org>).

Risultati

Complessivamente, durante le prime 5 giornate di test, i soggetti mostrano in media una performance di 0.508 ± 0.072 (media \pm SD), distribuita normalmente ($W=0.975$, $p\text{-value}=0.9559$) e non risulta essere significativa (t-test a campione unico, $t_{11} = 0.3698$, $p\text{-value}=0.719$).

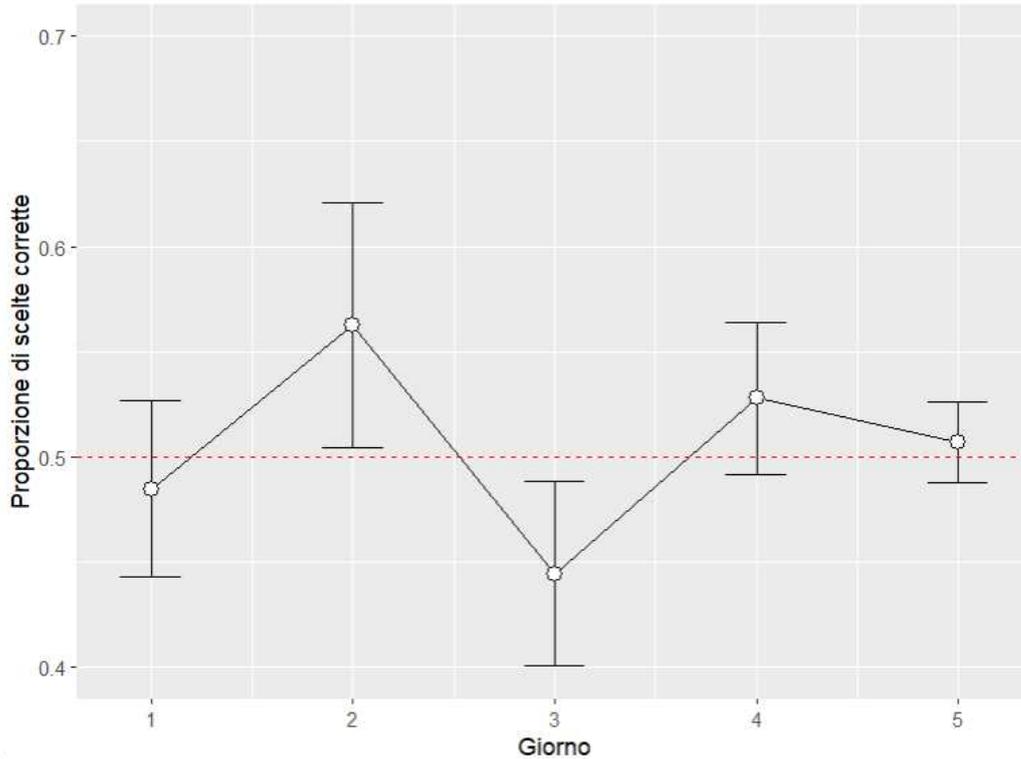


Grafico 1 Andamento medio di tutti i soggetti durante le giornate di training, asse delle x=giorno di training, asse y= proporzione di scelte corrette

Andando ad analizzare i soggetti individualmente, durante le prime 5 giornate si osserva che nessuno dei soggetti dimostra di aver appreso ad associare il probe con lo stimolo corretto.

Soggetto	Risposte corrette/Totale prove	P value
F1	28/60	0.699
F10	31/60	0.898
F11	27/60	0.519

F3	30/47	0.079
F4	26/60	0.366
F6	29/54	0.683
F7	29/60	0.897
F8	33/60	0.519
F9	34/60	0.366
S2	33/60	0.519
S5	22/60	0.052
S8	32/60	0.699

Tabella 1 performance complessiva delle prime cinque giornate

L'analisi a misure ripetute non ha evidenziato un effetto dovuto al passare dei giorni di test ($\chi^2_{1} = 0.0008$, $p = 0.977$), né al confronto utilizzato ($\chi^2_{3} = 1.579$, $p = 0.904$).

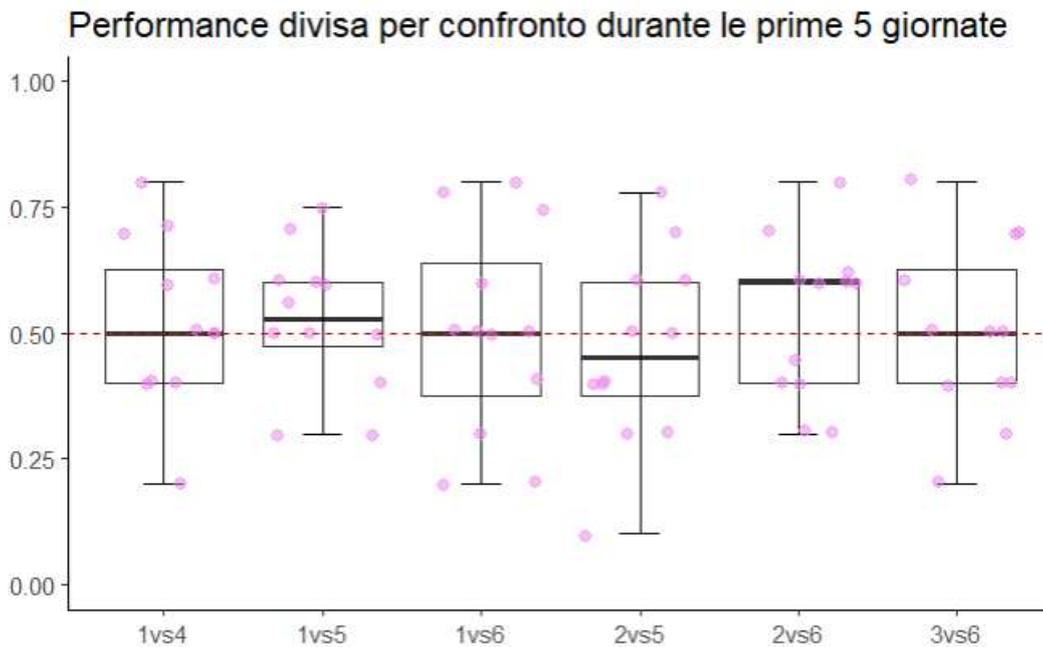


Grafico 2 boxplot confronti numerici, asse x=confronti e asse y=proporzioni di scelte corrette

Risulta esserci un effetto statisticamente significativo quando si osserva l'interazione tra posizione sinistra e destra con posizione frontale e posteriore ($\chi^2 = 11.8963$, $p < 0.001$). In particolare, sembra esserci un peggioramento quando lo stimolo viene osservato nella posizione frontale a destra (contrasto frontale destra – frontale sinistra, $z=3.746$, $p=0.001$).

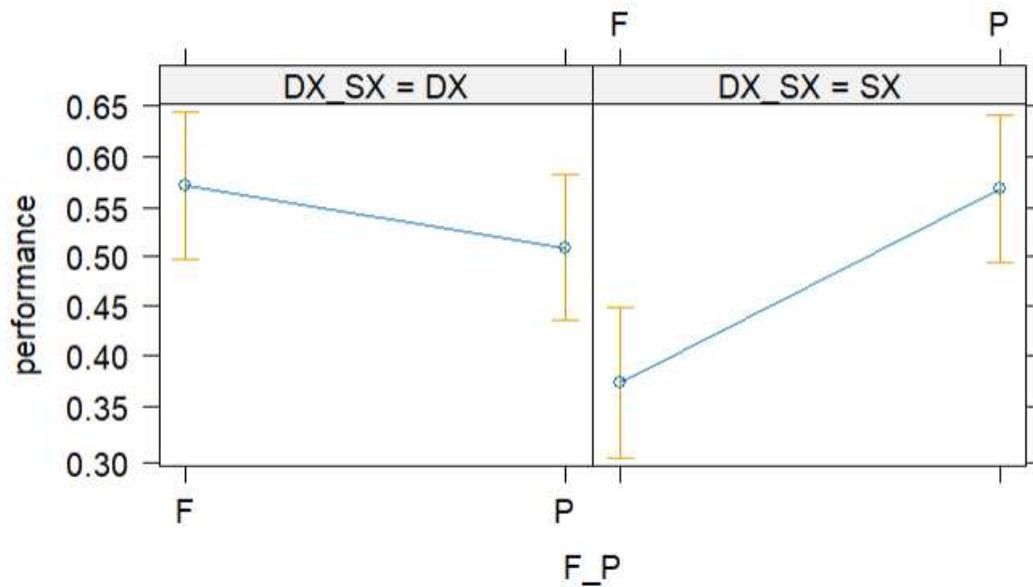


Grafico 3 interazione tra posizione destra e sinistra, con posizione frontale posteriore, asse y=proporzione di scelte corrette

5. DISCUSSIONE

La presente tesi si concentra sulle prime cinque giornate di training e l'analisi è stata effettuata sui dodici soggetti che hanno completato le tre fasi dell'esperimento.

Per effettuare la ricerca è stato utilizzato il paradigma MTS(matching to sample) simultaneo, utilizzato negli studi sugli animali per valutarne prestazioni di discriminazione e di memoria.

In questo studio si è voluta esaminare la capacità di discriminazione numerica nei *Poecilia reticulata* . La prima fase della ricerca ha permesso di constatare che gli esemplari sono in grado di associare stimoli e risposta alimentare, fornita direttamente dallo sperimentatore. Esistono studi precedenti, i quali utilizzano la medesima specie ma diversa procedura, in cui il rinforzo viene attaccato allo stimolo evitando che i pesci possano venire spaventati dallo sperimentatore addetto all'introduzione del cibo nella vasca (Dadda, Bisazza, Agrillo e Brown, 2015).

I risultati ottenuti collettivamente dimostrano che le prestazioni dei soggetti non sono significativamente diverse dal caso e nessun confronto sui soggetti risulta realmente significativo. C'è da considerare che non tutti i pesci hanno eseguito le prove tutti i giorni, F3 e F9 ad esempio hanno un numero di prove inferiori rispetto agli altri a causa di prove in cui non hanno cercato l'interazione con lo stimolo.

Anche per quanto riguarda i dati raccolti dalle analisi a livello individuale non sono presenti risultati statisticamente significativi e perciò si può dire che non sono stati raggiunti risultati tali per parlare di un vero e proprio apprendimento della discriminazione numerica. Le analisi a misure ripetute non hanno mostrato alcuna differenza con il passare dei giorni, mantenendo risultati simili dal primo al quinto giorno. I pesci utilizzati per l'esperimento dimostrano di non saper associare lo stimolo centrale (probe) con lo stimolo corretto, nemmeno nelle prove meno complesse, a differenza di quanto si può vedere in studi condotti precedentemente sulla stessa specie ma con diversi stimoli (Lucon-Xiccato, Petrazzini, Agrillo e Bisazza, 2015.)

Le analisi mostrano un peggioramento per quanto riguarda lo stimolo osservato nella posizione frontale destra mostrando un dato statisticamente significativo per quanto riguarda il riconoscimento di destra e sinistra piuttosto che per il numero effettivo delle figure dello stimolo. A questo proposito è interessante consultare uno studio condotto su dei pulcini di pollo domestico che dice che diverse specie di animali, tra cui i pesci, mostrano una preferenza laterale nella discriminazione delle quantità (Rugani, Salva e Regolin, 2014).

Lo studio della discriminazione numerica in letteratura è molto ampio, sia per quanto riguarda gli essere umani, sia per molte specie di animali. Queste conoscenze possono avere un ruolo fondamentale nello studio delle funzioni adattive dell'essere umano stesso. Uno studio su anfibi anuri (Stancher, Quaresmini, 2013) ha dimostrato che le abilità di discriminazione numerica di questa specie sono innate e di origine molto antica e ciò permette di dedurre che i vertebrati possiedono abilità di questo tipo da moltissimo tempo. L'avanzare della ricerca nel campo della cognizione animale è quindi fondamentale anche in animali come i pesci che, pur essendo meno complessi, possiedono capacità cognitive che utilizzano anche gli essere umani.

Per concludere, comprendere l'elaborazione delle numerosità negli animali può aiutarci, significativamente, ad identificare le basi evolutive delle competenze matematiche negli esseri umani. Questo può essere incredibilmente rilevante per quanto riguardano le ricerche sui disturbi dello sviluppo e la discalculia e su come le nostre abilità numeriche possano essere recuperate in caso di deficit (Beran, 2008).

6. BIBLIOGRAFIA

- Frisch, K. von. (1950). *Bees: Their vision, chemical senses, and language*. Cornell University Press
- Menzel, E.W. (1973). Chimpanzee spatial memory organization. *Science*, 182(4115), 943-945
- Bluff, Lucas A.; Weir, Alex A.S.; Rutz, (2007) "Tool-related cognition in New Caledonian crows". *KIP Articles*. 5333
- Sovrano, B. (2009) Perception of Subjective Contours in Fish. *Sage journals. Perception* 579-590
- Kawai, M. (2000) Numerical memory span in a chimpanzee. *Nature*, 403, 39-40
- Gabor, G. (2014) *Animal cognition*. Springer, 17, 1233-1243
- Lawal, E. (2012) Food and feeding habits of the guppy, *Poecilia reticulata*, from drainage canal systems in Lagos, Southwestern Nigeria. *West african Journal of Applied Ecology* 20 (2), 1-9
- Agrillo, D. B. B. (2015) Laterally enhances numerical skills in the guppy, *Poecilia reticulata*. *Animal behaviour* 77, 865-873
- Lucon-Xiccato, P. A. B. (2015) Guppies discriminate between two quantities of food item size over total amount. *Animal behaviour* 105, 113-119
- Rugani, S. R. (2014) Lateralized mechanisms for encoding of object. Behavioral evidence from an animal model: the domestic chick (*Gallus gallus*). *Frontier in Psychology*. 5, 150
- Stancher, Q. (2016) Alle radici della conoscenza matematica: un'indagine sulle abilità numeriche degli anfibi anur. *Quaderni di psicologia* 2, 45-60
- Beran (2008) *The Evolutionary and Developmental Foundations of Mathematics*. *PLoS biology* 2, e19