



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Psicologia Generale

SCUOLA DI DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE PSICOLOGICHE
INDIRIZZO PSICOBIOLOGIA
CICLO XXIV

L'ONTOGENESI E LA FILOGENESI DELLE
ABILITÀ NUMERICHE

Direttore della Scuola: Ch.ma Prof.ssa Clara Casco

Coordinatore d'Indirizzo: Ch.mo Prof. Alessandro Angrilli

Supervisore: Ch.mo Prof. Angelo Bisazza

Dottoranda: Laura Piffer

Indice

1. Introduzione	1
1. Le capacità numeriche nel mondo animale	1
2. La rappresentazione non verbale del numero.....	7
3. Lo sviluppo ontogenetico delle abilità numeriche	16
4. Il ruolo delle variabili continue	21
5. La cognizione numerica nei pesci	27
6. Obiettivi della tesi	31
2. Parte sperimentale.....	35
1. La specie	35
2. I sistemi numerici pre verbali.....	39
2.1 Esperimento 1. Il ruolo del rapporto numerico: un confronto tra pesci e esseri umani.....	39
2.1.1 Pesci	40
Soggetti sperimentali.....	40
Apparato sperimentale	42
Procedura sperimentale	44
2.1.2. Studenti universitari	46
Partecipanti	46
Stimoli e procedura	46
Pesci: Risultati	48
Studenti universitari: Risultati	50
2.2 Esperimento 2: La discriminazione tra piccoli e grandi numeri	53
Soggetti	53
Apparato e procedura sperimentale.....	53
Risultati	54
2.3 Discussione	56
3. L'ontogenesi delle abilità numeriche.....	61
3.1 Esperimento 3: Le abilità numeriche alla nascita	61
Soggetti	62
Apparato e procedura sperimentale.....	62
Risultati	63
3.2 Esperimento 4: Il limite del sistema dei piccoli numeri.....	65
Soggetti	65
Apparato e procedura sperimentale.....	65
Risultati	65
3.3 Esperimento 5: Il ruolo della maturazione e dell'esperienza nello sviluppo dell'abilità di discriminare grandi numerosità	67
Soggetti	67
Apparato e procedura sperimentale.....	68
Risultati	68
3.4 Discussione	70
4. Il ruolo delle variabili continue nei test di scelta spontanea	75
4.1 Esperimento 6: Uso spontaneo dell'informazione numerica	75

Soggetti	76
Apparato sperimentale.....	76
Procedura sperimentale	78
Risultati	79
4.2 Esperimento 7: Uso spontaneo dell'informazione numerica nelle prime fasi dello sviluppo	81
Soggetti	82
Apparato sperimentale.....	82
Procedura sperimentale	84
Risultati	86
4.3 Discussione	88
5. L'elaborazione delle variabili continue.....	93
5.1. Esperimento 8: Il costo cognitivo del numero e delle variabili continue	94
Soggetti	94
Apparato sperimentale e stimoli.....	95
Procedura sperimentale	96
Risultati	97
5.2 Discussione	100
6. Il sistema dei grandi numeri	103
6.1. Esperimento 9: Le variabili continue nell'apprendimento di discriminazioni tra grandi numerosità.....	103
Soggetti	104
Procedura sperimentale	104
Risultati	107
6.2 Esperimento 10: Il numero nell'apprendimento di discriminazioni tra grandi numerosità.....	109
Soggetti	109
Procedura sperimentale	109
Risultati	110
6.3 Esperimento 11: Il limite superiore del sistema dei grandi numeri.....	112
Soggetti	112
Apparato e procedura sperimentale.....	112
Risultati	113
6.4 Esperimento 12: Il rapporto numerico nel sistema dei grandi numeri	115
Soggetti	115
Apparato e procedura sperimentale.....	115
Risultati	116
6.5 Esperimento 13: Il sistema dei grandi numeri nell'uomo	117
Partecipanti.....	117
Stimoli e procedura	117
Risultati	118
6.6. Discussione.....	120
3. Conclusioni generali.....	125
4. Bibliografia	129

1. Introduzione

1. Le capacità numeriche nel mondo animale

Con il termine cognizione ci si riferisce ai meccanismi attraverso cui le informazioni che provengono dall'ambiente vengono acquisite, elaborate, e immagazzinate. Lo studio di questi meccanismi si avvale di diversi approcci: quello filogenetico permette di comprendere come questi meccanismi siano evoluti adattandosi ai specifici ambienti fisici e sociali di una specie, quello ontogenetico invece permette di osservare come questi cambino durante lo sviluppo (Shettleworth, 1998). Per comprendere come avvengano questi processi sono quindi necessarie spiegazioni a diversi livelli. Per questo motivo negli anni molti aspetti della cognizione sono stati indagati tramite studi comparativi. L'utilizzo di questo tipo di studi infatti non permette solo di individuare quali capacità cognitive siano diffuse tra gli animali, bensì permette anche di comprendere più a fondo alcuni aspetti della cognizione umana e di rispondere ad alcuni interrogativi, come quali capacità siano innate o quali siano le abilità cognitive prettamente umane (Haun et al., 2010)

In particolare, lo studio della cognizione numerica è uno degli ambiti dell'etologia e delle scienze cognitive che più è stato indagato attraverso un approccio filogenetico, confrontando la prestazione degli animali con quella degli esseri umani (Reznikova & Ryabko, 2011).

Inizialmente il confronto fra la specie umana e le altre specie era considerato difficile poiché si riteneva che le abilità numeriche fossero strettamente legate al linguaggio simbolico verbale. Tuttavia ora è stato dimostrato che i numeri non sono strettamente dipendenti dal linguaggio, ed infatti non tutte le culture posseggono delle parole per rappresentare i numeri. Ad esempio uno studio condotto su una popolazione indigena della Foresta Amazzonica (i Mundurukú), i quali non hanno delle parole per indicare le numerosità maggiori di 5, ha dimostrato come queste persone non siano in grado di compiere operazioni aritmetiche precise quando gli elementi coinvolti sono più di 4 o 5, ma sono comunque in grado di compiere discriminazioni approssimative

tra grandi quantità (Pica et al., 2004; Dehaene et al., 2008). Inoltre studi condotti con diversi approcci, sia comportamentali che neurobiologici, hanno permesso di cambiare la visione sulle capacità numeriche nel mondo animale, e ad oggi in letteratura è ampiamente accettata l'idea che gli animali condividano con gli esseri umani adulti la capacità di rappresentarsi diverse quantità, almeno in qualche forma rudimentale.

Negli ultimi anni numerose ricerche hanno portato nuove evidenze a sostegno della capacità negli animali di discriminare fra diverse quantità di cibo, oggetti, suoni, etc. In natura possedere questa capacità può essere vantaggioso in molte situazioni: difendersi dai predatori, trovare la fonte di cibo più abbondante, individuare la condizione che permette di ottimizzare le probabilità di accoppiamento. Può sembrare sorprendente che gli animali siano in grado di compiere delle discriminazioni numeriche, tuttavia è sempre bene contestualizzare le abilità cognitive degli animali nel loro ambiente naturale e analizzarle in termini di modi che gli animali hanno per adattarsi alle richieste del proprio contesto ecologico. L'adattamento cognitivo ha portato alcune specie a sviluppare notevoli abilità, come ad esempio la capacità di memorizzare e riconoscere molti compagni in base alle loro caratteristiche facciali negli scimpanzé e nelle scimmie (Parr & de Waal, 1999; Pokorny & de Waal, 2009), a ricordare molti luoghi in cui si è nascosto il cibo in alcune specie di uccelli e di mammiferi (Clayton & Dickinson, 1998; Shettleworth, 1998), e grandi capacità spaziali nei ratti (Hodges, 1996). Alcune specie mostrano addirittura delle abilità cognitive, in ambiti molto specifici, più elevate di quelle degli esseri umani. Ad esempio i piccioni hanno prestazioni più elevate di quelle dell'uomo in compiti che richiedono il riconoscimento di stimoli tridimensionali scomposti (Spetch & Friedman, 2006).

In letteratura sono numerosi gli studi condotti attraverso osservazioni naturalistiche che dimostrano l'utilizzo spontaneo in ambiente naturale di alcune competenze numeriche rudimentali.

Uno studio condotto da McComb e collaboratori (1994) sulle leonesse nel Parco Nazionale del Serengeti ha dimostrato che la risposta territoriale dipende dal numero di potenziali oppositori. Attraverso una tecnica di playback gli autori hanno riscontrato che l'approccio delle femmine era più cauto quando venivano

esposte al ruggito di tre femmine non familiari rispetto a quando lo stesso numero di suoni proveniva da un singolo individuo (Fig.1).

Anche lo studio di Wilson e collaboratori (2002) è un altro esempio di come possedere la capacità di compiere discriminazioni numeriche possa essere un mezzo per prevenire i costi di una possibile sconfitta. In questa ricerca infatti è stato



Fig. 1: *Le leonesse sono in grado di valutare la numerosità dei conspecifici in base ai ruggiti che percepiscono (McComb et al., 1994).*

dimostrato che gli scimpanzé decidono di intraprendere interazioni aggressive contro un altro gruppo di conspecifici solo quando il gruppo di appartenenza è più numeroso di quello da offendere, e in particolare quando il rapporto numerico tra i due gruppi è di almeno una volta e mezzo in favore del proprio gruppo, come nel caso di sei individui rispetto a quattro. In questo caso la capacità di stimare in modo abbastanza preciso la dimensione dei due gruppi permette agli scimpanzé di prendere decisioni vantaggiose in base alla probabilità di successo nello scontro.

Negli ultimi anni molte ricerche naturalistiche hanno utilizzato come modello sperimentale diverse specie di uccelli parassiti di covata. Queste specie infatti rappresentano un buon modello per studiare le abilità numeriche degli animali in natura poiché per deporre le loro uova devono saper discriminare il numero di uova presenti nel nido e se questo cambia con il passare dei giorni. È stato documentato (Lyon, 2003) che le folaghe americane usano spontaneamente una strategia di calcolo numerico delle uova depositate nel proprio nido al fine di eliminare, qualora il numero di uova sia diverso rispetto all'ultima stima, quelle inserite da altri conspecifici. Più recentemente, White e collaboratori (2009) hanno condotto una ricerca sulle modalità di selezione del nido nel parassitismo di covata delle femmine di molotro nero (*Molothrus ater*). In concomitanza ad altri fattori, la probabilità di sopravvivenza dei piccoli dipende dalla capacità della madre di individuare il nido migliore da parassitare. Una delle variabili che definiscono una scelta ottimale è quella di depositare le uova all'inizio del periodo di incubazione da parte della femmina parassitata e uno dei parametri più

affidabili per guidare tale decisione è poter valutare il cambiamento nel numero della uova presenti nel nido: un giorno senza che la femmina ospite abbia depositato un uovo è indicatore probabile dell'avvenuto inizio dell'incubazione. Nel presente studio le femmine di molotro potevano visitare in due momenti successivi nidi in cui erano presenti un diverso numero di uova. Dalle analisi condotte dai ricercatori è risultato che i soggetti preferiscono non solo i nidi in cui è variato il numero di uova tra la prima e la seconda visita, ma preferiscono quelli in cui il numero di uova è aumentato proporzionalmente al numero di giorni trascorsi tra le due visite. Anche per le specie d'uccelli che generano piccoli già indipendenti alla nascita, come ad esempio le anatre, è importante saper scegliere il nido in cui deporre le proprie uova. Infatti le femmine parassite tendono a scegliere quei nidi in cui la fase di incubazione non è ancora cominciata, in modo da sincronizzare la covata con quella dell'ospite. Un recente studio condotto in natura ha dimostrato che l'anatra sposa (*Aix sponsa*) decide in quale nido deporre le proprie uova in base alla quantità di uova già presenti e tende a preferire quelli in cui ve ne sono meno (Odell & Eadie, 2010). In generale l'approccio ecologico allo studio della cognizione animale si è prevalentemente concentrato sullo sviluppo delle abilità cognitive in risposta alle pressioni selettive legate alle necessità di foraggiamento. Questi studi dimostrano invece che anche altre richieste presenti nell'ambiente di adattamento evolutivo possono aver avuto un ruolo fondamentale nello sviluppo di capacità quali la rappresentazione del tempo, dello spazio e, nel caso specifico, del numero.

Nel corso degli anni sono state condotte anche numerose ricerche in laboratorio che rispetto alle osservazioni naturalistiche hanno il vantaggio di permettere di indagare in maniera più sistematica le caratteristiche delle competenze numeriche negli animali. Gli studi condotti in laboratorio permettono infatti un maggior controllo delle variabili che influenzano le abilità osservate e consentono quindi uno studio più approfondito di quali siano limiti e potenzialità di tali capacità.

Uno dei metodi sperimentali maggiormente utilizzato è l'analisi delle scelte spontanee operate dai soggetti sulla base della loro tendenza a scegliere l'insieme di maggiore o minore numerosità tra quelli presentati. Tramite questo

paradigma è quindi possibile valutare la capacità di compiere giudizi di numerosità relativa che implicano un semplice processo decisionale in cui uno stimolo viene giudicato diverso da un altro in base alla numerosità. Questa capacità è quindi una delle forme più basilari di giudizio numerico e non necessita della capacità di contare ma piuttosto dell'aver un generale senso del "più" e del "meno". Infatti contare richiede un'abilità diversa che implica una discriminazione del numero assoluto degli elementi che compongono un insieme (Davis & Pérusse, 1988).

La capacità di compiere delle discriminazioni per mezzo della numerosità relativa è stata dimostrata in molte specie animali, utilizzando diverse procedure e diversi tipi di stimoli. Hauser e collaboratori (2000), ad esempio, hanno sottoposto a test esemplari di macaco rhesus (*Macaca mulatta*). Venivano posti sul terreno due contenitori opachi all'interno dei quali venivano inseriti uno alla volta alcuni pezzi di frutta; l'assunto di fondo prevedeva che se i macachi fossero stati in grado di stimare la quantità di ciascun contenitore avrebbero spontaneamente scelto quello contenente il maggior quantitativo di cibo. I risultati hanno documentato questa capacità in confronti numerici di un frutto rispetto a due, due rispetto a tre e tre rispetto a quattro. Ciò mostra che i soggetti sono stati in grado di sommare le quantità di cibo osservate ed operare di conseguenza la decisione per loro più vantaggiosa.

La tecnica della scelta spontanea è stata utilizzata anche nel primo studio che ha indagato la competenza numerica in un anfibio, il pletodonte cinerino (*Plethodon cinereus*). Tramite la presentazione simultanea di due tubi trasparenti contenenti ciascuno un diverso numero di moscerini della frutta, si è dimostrato che questa salamandra è in grado di scegliere la quantità maggiore di cibo (Uller et al., 2003).

Altri studi di laboratorio si avvalgono invece della procedura di addestramento; in questo caso non viene osservato il comportamento spontaneo ma l'animale viene addestrato attraverso specifiche procedure di training a scegliere il gruppo più o meno numeroso. In un famoso studio sono stati addestrati macachi rhesus (*Macaca mulatta*) a rispondere a gruppi di stimoli visivi di diversa numerosità ordinandoli in modo crescente da 1 a 4 sulla base della quantità degli

elementi. Successivamente ai soggetti venivano presentate nuove numerosità, precisamente gruppi composti da un minimo di 5 a un massimo di 9 elementi. I risultati hanno mostrato come le scimmie fossero in grado di generalizzare la regola appresa anche alle nuove numerosità e di risolvere così il compito anche durante questa seconda fase della ricerca. Questo studio quindi, oltre a mettere in luce la capacità di elaborare la numerosità di un insieme di elementi, ha fornito una delle prime evidenze dell'esistenza di un concetto di ordinalità nei primati non umani (Brannon & Terrace, 1998).

La maggior parte dei gruppi di ricerca che si sono avvalsi di procedure di addestramento hanno utilizzato come modello sperimentale i primati non umani, ma alcuni studi sono stati condotti anche su altre specie, come ad esempio gli uccelli. Le ricerche di Pepperberg (2006) riportano i risultati ottenuti in anni di addestramento di un pappagallo. L'animale ha dimostrato di disporre di capacità cognitive necessarie per sommare piccole quantità numeriche. In una ricerca successiva (Rugani et al., 2008) è stato documentato che anche i pulcini di pollo domestico possono imparare a distinguere tra due numerosità di oggetti bidimensionali al fine di ottenere un compenso alimentare. In particolare i soggetti venivano inseriti in un'arena rettangolare e addestrati a beccare la parte superiore di due scatole poste all'estremità dell'apparato, in corrispondenza degli stimoli associati alle scatole. Solo la scatola associata alla numerosità rinforzata permetteva di ottenere cibo (Fig. 2). I risultati della ricerca documentano come i

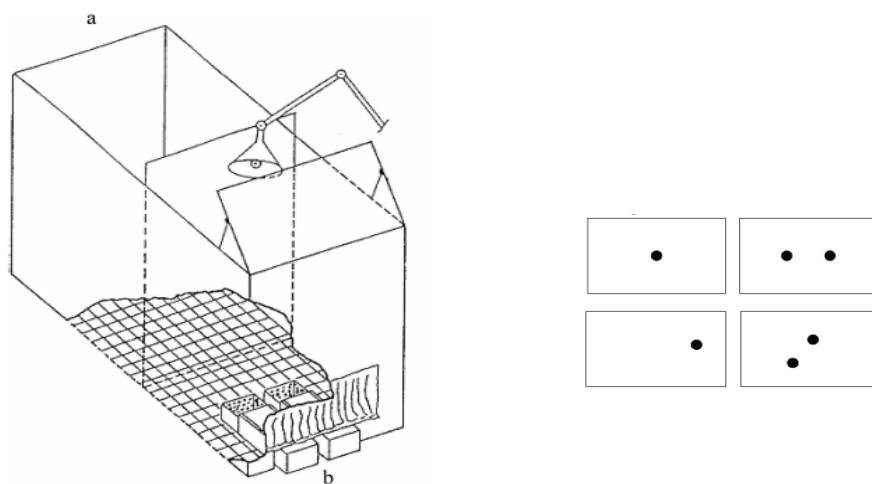


Fig. 2: Apparato utilizzato per addestrare pulcini di pollo domestico e esempio di stimoli posti in corrispondenza delle fonti di cibo (Rugani et al., 2008). Il soggetto veniva inserito dentro l'apparato (a); in una parte si trovavano due potenziali fonti di cibo (b).

pulcini siano in grado di compiere una discriminazione fine tra due numerosità solamente quando i gruppi a confronto non superano le tre unità (1 vs. 2 e 2 vs. 3).

Questo genere di ricerche sono state condotte anche sugli insetti. Dacke e Srinivasan (2008) hanno addestrato delle api (*Apis mellifera*) a raggiungere un contenitore di cibo che veniva collocato dopo un determinato numero di punti di riferimento, identici ed equispaziati, posizionati a partire dall'alveare. Nel test la distanza assoluta del cibo dall'alveare e la forma dei punti di riferimento veniva variata rispetto alla fase di addestramento, fornendo prova della capacità delle api di poter elaborare ed utilizzare l'informazione numerica presente nell'ambiente.

2. La rappresentazione non verbale del numero

Il sistema simbolico verbale consente di ottenere una rappresentazione molto precisa delle quantità e quindi di poter compiere delle discriminazioni molto fini, come ad esempio distinguere tra 33 e 34 elementi in un insieme. Al contrario, quando le quantità sono rappresentate tramite il sistema numerico non verbale, la discriminazione fra più insiemi è fortemente influenzata dal rapporto numerico che intercorre tra i due. Ciò significa che quando si ha accesso al codice verbale il confronto fra 1504 e 1505 è uguale a quello tra 4 e 5, mentre questo non è vero quando ci si affida al sistema numerico non verbale, poiché il rapporto nei due confronti è molto diverso. Una possibile spiegazione della differenza fra questi due sistemi è che nel sistema non verbale la rappresentazione della quantità sia in formato analogico (Dehaene, 1992; Feigenson et al., 2004; Gallistel & Gelman, 1992). In questo formato la numerosità è rappresentata come un grandezza mentale che è proporzionale alla quantità che rappresenta, di conseguenza quando le quantità sono rappresentate in questo formato le discriminazioni seguono la legge di Weber. Secondo questa legge all'aumentare della numerosità totale è necessario aumentare la distanza numerica per poter discriminare le due quantità, ovvero la discriminazione diviene più difficile all'aumentare del rapporto numerico (Brannon et al., 2010). Diversi modelli sono stati proposti per spiegare il funzionamento del sistema numerico non verbale. Ad oggi in letteratura è ampiamente accettato il modello dell'*analog magnitude*

proposto da Meck e Church (1983), ovvero un sistema che permetterebbe di discriminare anche numerosità molto grandi, purché vi sia un'adeguata distanza numerica tra i gruppi. Ogni oggetto verrebbe rappresentato come un impulso dal sistema nervoso centrale, il sistema cognitivo accumulerebbe poi i segnali ottenuti dalla visione di ciascuno stimolo per trasferire l'informazione alla memoria di lavoro; infine verrebbe assegnata un'etichetta al livello complessivo di impulsi raggiunti in questo ipotetico accumulatore. Questo sistema può essere paragonato

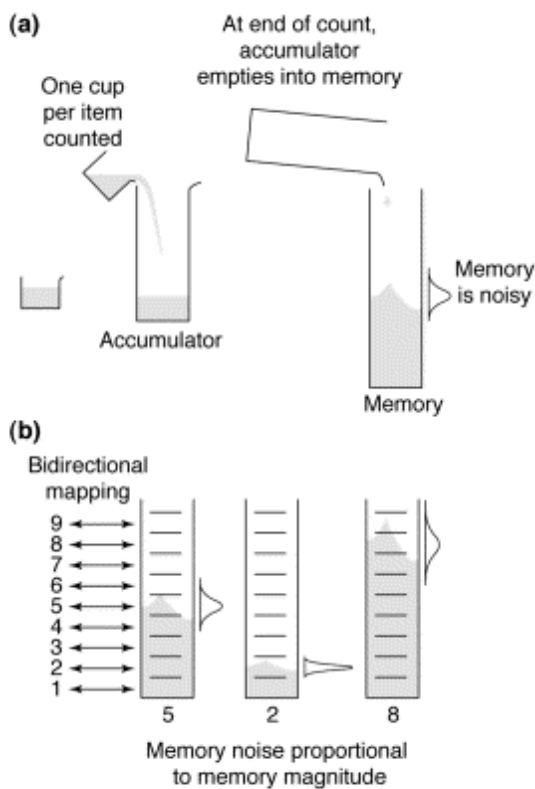


Fig. 3: Il modello dell'analog magnitude prevede che il sistema cognitivo accumuli i segnali ricavati da ciascuno stimolo. Alla somma degli impulsi così ottenuta viene poi assegnata un'etichetta numerica (Gallistel & Gelman, 2000).

numerico sulla prestazione nei compiti di discriminazione numerica è stata dimostrata in molte specie animali e utilizzando diversi paradigmi sperimentali. Per quanto riguarda i primati, Cantlon e Brannon (2006) hanno addestrato alcuni macachi rhesus ad ordinare in maniera crescente coppie di insiemi composti da un minimo di 1 ad un massimo di 9 elementi. Due insiemi venivano presentati

ad un recipiente graduato in cui ogni goccia versata rappresenta un oggetto o un evento (Fig. 3a). Numeri diversi sono quindi rappresentati da livelli differenti ai quali vengono attribuite etichette diverse. Tuttavia, se la distanza tra due livelli è piccola, può succedere che essi ricadano all'interno della stessa etichetta, rendendo difficile la discriminazione tra le due quantità. Tale sistema non sarebbe quindi preciso in quanto non riuscirebbe a rappresentare il numero esatto di elementi di un insieme. Più le numerosità sono grandi, maggiore è la variabilità della loro rappresentazione e quindi la possibilità di riuscire a discriminarle diventa più difficile (Fig. 3b).

L'influenza del rapporto

attraverso un monitor e i soggetti imparavano a toccare prima il più piccolo e poi il più grande tra i due. I risultati mostrano che le scimmie sono in grado di discriminare i due insiemi anche quando nella fase del test vengono introdotte nuove numerosità (10, 15, 20 e 30) mai presentate durante la fase di addestramento. Le autrici trovano inoltre che indipendentemente dalla numerosità assoluta dei gruppi-stimolo, l'accuratezza e la latenza della risposta sono correlate con il rapporto numerico esistente tra i due insiemi messi a confronto: minore è il rapporto, più accurata è la risposta. Risultati simili sono stati trovati anche con altre specie animali. Uno studio condotto sui pappagalli (*Psittacus erithacus*) mostra come anche alla base delle abilità di giudizio numerico di questa specie sarebbe presente un meccanismo cognitivo concorde con l'ipotesi del modello dell'analog magnitude (Al Aïn et al., 2009). Ai pappagalli venivano presentati simultaneamente due gruppi di cibo di diversa quantità che poteva variare da un minimo di 1 ad un massimo di 5, calcolata in termini discreti nel primo esperimento e in termini continui nel secondo. I risultati mostrano come i pappagalli si dirigano spontaneamente verso l'insieme più abbondante e l'analisi dei dati mette in luce una correlazione positiva tra la prestazione dei soggetti e il rapporto numerico, indipendentemente dalla numerosità degli insiemi.

Un effetto del rapporto numerico è stato trovato anche negli esseri umani adulti. Infatti nonostante normalmente venga utilizzato il conteggio verbale per risolvere problemi matematici, il sistema di rappresentazione non verbale delle quantità coesiste con quello verbale. Quando gli adulti sono sottoposti a test in condizioni in cui viene impedito l'accesso al codice linguistico (ad esempio in condizione di soppressione articolatoria o di doppio compito con stimoli verbali) la loro prestazione è molto simile a quella degli animali. In uno studio di Cantlon e Brannon (2007a) è stata confrontata la prestazione di studenti universitari con quella di esemplari di macaco rhesus, utilizzando gli stessi stimoli e la stessa procedura sperimentale. Il compito prevedeva l'apparizione su uno schermo di un insieme di pallini e, dopo un breve intervallo, l'apparizione di un secondo insieme. In seguito venivano presentati due nuovi insiemi di pallini: uno era formato dalla somma dei precedenti mentre l'altro fungeva da distrattore. Il compito dei soggetti era di indicare quale tra i due insiemi contenesse un numero

di elementi pari alla somma dei precedenti. A livello quantitativo la prestazione delle scimmie è inferiore a quella degli uomini, ma l'andamento della prestazione nelle due specie è simile, ovvero è influenzato dal rapporto numerico. Questi risultati non solo ci mostrano che uomini e scimmie hanno prestazioni paragonabili quando svolgono lo stesso compito, ma ci suggeriscono anche che il sistema che elabora l'informazione numerica possa essere lo stesso nelle due specie.

Nonostante un effetto del rapporto numerico sia stato trovato in molte specie animali, allo stato attuale gli studi comparativi con l'uomo sono limitati ai primati. Sarebbe quindi interessante individuare degli stimoli e delle procedure sperimentali che possano essere impiegati anche con specie diverse, allo scopo di comprendere quali pressioni selettive possano aver portato allo sviluppo di capacità numeriche simili (Brannon et al., 2010).

Nel complesso i dati fin qui riportati indicano che negli animali e, qualora sia impedito l'accesso al codice verbale, anche nell'uomo la stima delle quantità è approssimativa e l'accuratezza è influenzata dal rapporto numerico. Questo fenomeno può essere spiegato attraverso il modello dell'analog magnitude.

Tuttavia in letteratura è stato descritto un secondo fenomeno per cui quando le numerosità confrontate sono piccole la discriminazione può essere molto precisa ed accurata anche in assenza di linguaggio simbolico verbale. Jevons (1871) fu il primo a notare che stimando il numero di fagioli presenti in un piatto non commetteva mai errori quando questi erano meno di quattro, mentre la sua stima era sempre meno accurata all'aumentare del numero di fagioli. Successivi studi hanno confermato questa prima osservazione aneddotica. Il fenomeno percettivo che permette di elaborare in modo veloce e accurato la numerosità di un insieme formato da meno di cinque unità è stata definito "subitizing" (Kaufman et al., 1949).

Recentemente il fenomeno del subitizing è stato interpretato alla luce del modello dell'*object-file* (Carey, 1998; Hauser & Carey, 1998; Leslie et al., 1998; Simon, 1997; Uller et al., 1999; Spelke & Kinzler, 2007). Secondo questo modello ogni elemento di un insieme sarebbe rappresentato da un simbolo, detto "file", che contiene diverse informazioni sullo stimolo, come ad esempio il colore,

la forma e la dimensione. Questa prima caratteristica del modello object-file è stata dimostrata, ad esempio, nello studio di Feigenson e collaboratori (2002) con bambini di 10 e 12 mesi di vita, i quali confrontavano le diverse quantità in base a caratteristiche percettive degli stimoli, come la superficie totale o lo spazio occupato, piuttosto che attraverso un processo di corrispondenza uno a uno. Le rappresentazioni dell'object-file mantengono comunque indirettamente anche l'informazione numerica. Infatti, poiché ad ogni elemento può corrispondere un unico file, il numero di file rappresenta implicitamente il numero di elementi presenti nel set (Hauser & Carey, 2003). Un'altra importante caratteristica è la *set-size signature*, ovvero il numero massimo di elementi che possono essere rappresentati in parallelo e immagazzinati nella memoria a breve termine. Il successo della discriminazione quindi non è determinato dal rapporto numerico tra le quantità confrontate come accade per il modello dell'analog magnitude, bensì dal numero di oggetti che compongono il set, che non può superare le 3 unità nei bambini in età pre verbale e le 4 unità negli esseri umani adulti e nei primati (Uller et al., 2003; Hauser et al., 2000; Feigenson et al., 2002; Wood et al., 2008).

Il modello object-file permetterebbe di spiegare dati provenienti sia da studi condotti bambini in età pre verbale che da studi condotti su umani adulti. Ad esempio alcune ricerche hanno evidenziato come bambini di 10 mesi siano in grado di risolvere confronti numerici tra numerosità inferiori a 3 (es. 1 vs. 2), mentre falliscono di fronte a confronti con lo stesso rapporto numerico ma tra numerosità più grandi (es. 3 vs. 6) (Feigenson et al., 2002).

Ad oggi ancora non è chiaro se il processo di subitizing e quello di stima siano dovuti a due meccanismi distinti o piuttosto sovrapposti. Molti autori hanno proposto che queste due operazioni non siano di natura diversa, ma che semplicemente riflettano due diversi livelli lungo lo stesso continuum di complessità (Balakrishnan & Ashby, 1991); altri autori invece hanno ipotizzato una dicotomia tra questi due processi, suggerendo che essi siano separati e qualitativamente diversi (Trick & Pylyshyn, 1993).

I sostenitori della prima ipotesi propongono che l'analog magnitude sottenda la rappresentazione di tutti i valori della scala numerica. Secondo questi autori la precisione delle rappresentazioni diminuisce all'aumentare del numero.

Ciò significa che le piccole numerosità vengono rappresentate in modo nitido e distinto e questo fa in modo che le loro rappresentazioni non si sovrappongano. Vi è quindi una bassa probabilità di confondere le due numerosità. Anche tra i piccoli numeri la prestazione sarebbe sensibile al rapporto numerico tra le numerosità confrontate e quindi soggetta alle stesso meccanismo (analog magnitude) che sottende la discriminazione fra grandi numeri (Gallistel & Gelaman, 1992).

Vi sono numerosi dati sperimentali a favore dell'esistenza di un unico meccanismo non verbale valido lungo tutta la scala numerica. Ad esempio vanMarle e Wynn nel loro studio del 2009 hanno esaminato la capacità di discriminare stimoli uditivi in bambini di 7 mesi. I confronti numerici presentati erano 2 vs. 4 (rapporto di 0.5) e 2 vs. 3 (rapporto di 0.67). I bambini sono stati in grado di discriminare 2 suoni da 4 suoni mentre non sono stati in grado di compiere la discriminazione tra 2 e 3 suoni. I dati di questo esperimento suggeriscono quindi che la capacità di discriminare quantità di suoni che ricadono nel range delle piccole numerosità in bambini di 7 mesi sia influenzata dal rapporto numerico così come accade per i grandi numeri. Questo studio fornisce quindi supporto all'ipotesi che l'analog magnitude sia alla base anche delle rappresentazioni dei piccoli numeri. Rimane aperta però la possibilità che questo sia valido solo nel caso degli stimoli non visivi. Infatti gli autori sottolineano come l'object-file sia un meccanismo responsabile della rappresentazione visiva degli oggetti di un insieme e come tale sarebbe utilizzabile solo per stimoli che implicino l'elaborazione visiva e non per altre modalità.

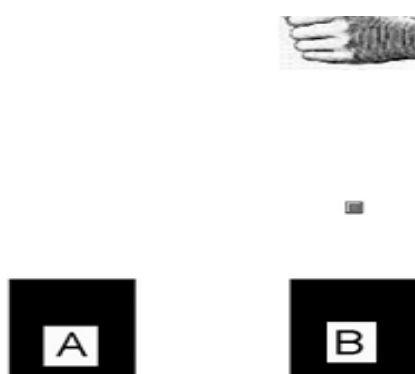


Fig. 4: Gli stimoli scendevano sequenzialmente dalla mano dietro il rettangolo (Beran, 2007)

Beran (2007) ha studiato la capacità della scimmia rhesus (*Macaca mulatta*) di discriminare grandi e piccoli set presentati sequenzialmente. Ai soggetti venivano presentati su uno schermo due diversi insiemi di stimoli i cui elementi erano presentati sequenzialmente, in modo tale che l'insieme non fosse mai visibile nel suo complesso (Fig. 4). Il compito della scimmia era quello di selezionare l'insieme

formato dal maggior numero di elementi. Dopo una fase di addestramento i soggetti venivano sottoposti ad una fase di test in cui le numerosità presentate variavano da 1 a 10 unità. I risultati hanno mostrato che all'aumentare del rapporto numerico tra i set la performance peggiorava anche quando le numerosità coinvolte erano inferiori a 3, suggerendo così che il meccanismo dell'analog magnitude sia responsabile anche della rappresentazione dei piccoli numeri.

Altri autori invece propongono l'esistenza di due sistemi numerici indipendenti per la rappresentazione dei piccoli e dei grandi numeri. Infatti molti studi hanno dimostrato che la discriminazione fra insiemi che differiscono di una sola unità è possibile solo quando il numero di elementi per ogni insieme rimane entro le 3 o 4 unità (Feigenson et al., 2002; Hauser et al., 2000). Alla base di questa discriminazione potrebbe esserci il meccanismo object-file. Per compiti che coinvolgono numerosità maggiori di 4 potrebbe intervenire invece l'altro sistema (analog magnitude), con caratteristiche quasi complementari al primo, in grado di discriminare anche tra insiemi più numerosi purché la distanza tra questi sia sufficientemente ampia.

Nell'uomo il processo del subitizing è oggetto di studio già da numerosi decenni. I primi studi si sono focalizzati sui tempi di risposta e sull'accuratezza in compiti di stima numerica. Questi hanno evidenziato come in soggetti adulti la curva dei tempi di risposta a numerosità all'interno del subitizing cresca meno velocemente di quanto non accada per i tempi di risposta a numeri oltre il limite del subitizing. Inoltre nella stima di piccoli numeri si riscontra una bassa percentuale di errori, che invece aumenta nei grandi numeri (Simon et al., 1993). Ad esempio in uno studio di Chi e Klahr (1975) condotto su soggetti umani adulti venivano presentati degli insiemi di pallini che potevano variare da 1 a 10. Il compito dei soggetti era quello di stimarne la numerosità. I risultati ottenuti hanno evidenziato che fino a quattro pallini i tempi di risposta aumentavano di 46 ms per ogni elemento aggiunto, mentre oltre tale limite l'incremento era di 307 ms per ogni unità. Questi risultati sono confermati da numerose altre ricerche che individuano simili incrementi nei tempi di risposta: approssimativamente tra i 20 e i 50 ms per ogni unità aggiunta nel range del subitizing e tra i 250 e i 300 ms nel

range dei grandi numeri (Saltzman & Garner, 1948; Kaufman et al., 1949; Mandler & Shebo, 1982).

Più recentemente, in uno studio di Revkin e collaboratori (2008), è stata confrontata la prestazione in un compito di denominazione di numerosità quando i numeri coinvolti erano tra 1 e 8 con quella di quando i numeri erano tra 10 e 80. Se la legge di Weber fosse valida lungo tutta la scala numerica, allora la prestazione nei confronti 1 vs. 2 e quella nel confronto 10 vs. 20 non dovrebbero differire in quanto entrambi i confronti hanno un rapporto numerico di 0.50. I risultati di questo studio però hanno evidenziato una chiara differenza di performance nelle due condizioni, ovvero una migliore prestazione nel range del subitizing. Inoltre è stato dimostrato che la discriminazione tra i piccoli numeri era indipendente dal rapporto numerico.

Hyde e Spelke (2009) hanno condotto uno studio con la tecnica dei potenziali evocati, in cui è stato dimostrato che i processi di rappresentazione e comparazione di grandi e piccoli numeri elicitano risposte neurali differenti. Inoltre l'intensità della risposta evocata dai grandi numeri (P2p) è modulata dal rapporto numerico che intercorre tra le numerosità messe a confronto. Questo non accade invece quando sono coinvolte piccole numerosità. Gli autori interpretano questi dati alla luce del fatto che gli insiemi di piccoli numeri potrebbero evocare rappresentazioni parallele di oggetti singoli, mentre insiemi più numerosi evocherebbero delle rappresentazioni sommarie di un dato numero. L'attività cerebrale aumenterebbe quindi all'aumentare del numero di oggetti che devono essere registrati o individuati, mentre alla presenza di piccoli numeri potrebbe essere spontaneamente impiegato un meccanismo specifico per la loro rappresentazione.

Per quanto riguarda gli studi condotti sugli animali, Tomonaga e Matzusawa (2002) hanno dimostrato che nello scimpanzé in un compito di enumerazione i tempi di risposta aumentano all'aumentare del rapporto numerico quando sono coinvolte grandi numerosità, mentre rimangono costanti all'interno del range dei piccoli numeri.

Altri studi sembrano indicare che sistemi numerici indipendenti potrebbero esistere anche per diverse specie di vertebrati. Ad esempio in un recente studio è

stato dimostrato che i cani (*Canis lupus familiaris*) nella decisione di attaccare un gruppo rivale valutano la grandezza del gruppo opponente, e il rapporto numerico che intercorre tra i due gruppi influenza la loro decisione. Quando invece la numerosità del gruppo è minore di 4 la probabilità di attacco è indipendente dal rapporto numerico (Bonanni et al., 2010). Infine dati a sostegno di due sistemi indipendenti provengono anche dagli uccelli e dagli insetti. Infatti sia i pulcini di pollo domestico (*Gallus gallus*) che le api (*Apis mellifera*) si sono mostrati in grado di discriminazioni fini all'interno del range dei piccoli numeri, discriminando il confronto 2 vs. 3, mentre falliscono in un confronto con lo stesso rapporto numerico ma che appartiene ai grandi numeri (4 vs. 6) (Rugani et al., 2008; Gross et al., 2009). Tuttavia questi ultimi dati possono essere interpretati anche in base ad una diversa spiegazione: queste specie potrebbero non essere in grado di discriminare grandi numerosità indipendentemente dal rapporto numerico. L'esistenza negli animali di un sistema indipendente per la rappresentazione dei piccoli numeri rimane quindi ancora una questione irrisolta.

A favore dell'ipotesi di due sistemi numerici indipendenti, oltre all'evidenza di una diversa sensibilità al rapporto numerico nei due diversi range, vi sono anche alcuni studi condotti su bambini in età pre verbale che hanno messo in luce la loro incapacità di risolvere discriminazioni tra piccole e grandi quantità, nonostante un rapporto numerico favorevole. Feigenson et al. (2002) hanno dimostrato come infanti di 10-12 mesi falliscano nei confronti 2 vs. 4 e 3 vs. 6, nonostante il rapporto sia di 0.50, tradizionalmente discriminato sia per piccole che per grandi quantità. Lo stesso avviene anche all'età di 6 mesi sia con stimoli acustici che visivi: gli infanti non sembrano in grado di distinguere 2 da 4 (piccolo vs. grande), mentre risolvono una corretta discriminazione fra 4 e 8 (grande vs. grande), nonostante il medesimo rapporto numerico (Xu, 2003; Lipton & Spelke, 2004; Wood & Spelke, 2005). Il confronto diretto tra piccole e grandi quantità sembra quindi suggerire l'esistenza di due sistemi distinti nei bambini; ciononostante, ad oggi, non si registra alcuno studio che abbia presentato sistematicamente piccoli contro grandi numeri negli animali per sottoporre a test l'ipotesi relativa a due sistemi anche in specie non umane.

In conclusione, in letteratura è ampiamente accettata l'idea che uomini e animali condividano lo stesso sistema per la rappresentazione approssimativa delle quantità, mentre ancora non è chiaro se anche negli animali vi sia un secondo sistema responsabile della rappresentazione dei piccoli numeri. Gli studi qui riportati dimostrano come in determinate condizioni sperimentali i soggetti utilizzino il sistema dell'analog magnitude anche per la rappresentazione dei piccoli numeri. Questi risultati comunque non escludono la possibilità che in altre condizioni i piccoli numeri siano rappresentati da un sistema differente.

3. Lo sviluppo ontogenetico delle abilità numeriche

Negli ultimi decenni numerosi studi sono stati condotti con lo scopo di comprendere l'origine e lo sviluppo delle abilità numeriche pre verbali.

Molti lavori si sono concentrati sulla discriminazione tra grandi quantità. Ad oggi un unico studio ha indagato la capacità di discriminare grandi numeri in bambini di pochi giorni di vita. Izard e collaboratori (2009) hanno dimostrato che neonati di due giorni di vita sono in grado di individuare quale stimolo visivo e quale stimolo uditivo abbiano lo stesso numero di elementi, quando il rapporto numerico è molto favorevole (0.33), come nel caso di 4 vs. 12, mentre falliscono quando il rapporto è più difficile. Questi risultati suggeriscono che nella specie umana la capacità di discriminare grandi quantità sia già presente alla nascita ma in maniera imprecisa.

La maggior parte delle ricerche invece è stata condotta con bambini dai 6 mesi in su. Nello studio di Xu e Spelke (2000) è stata indagata la capacità di discriminare grandi numeri in bambini di 6 mesi di vita, utilizzando la procedura di abituação e disabituação. In questa procedura vengono presentati ripetutamente su uno schermo degli stimoli formati da un determinato numero di elementi fino a quando i tempi di fissazione del bambino decrescono ad un livello di soglia, indicando così che si è abituato allo stimolo. In seguito nella fase di disabituação vengono mostrati due stimoli, uno con la stessa numerosità dello stimolo utilizzato nell'abituação e uno con una nuova numerosità. Il principio teorico che sta alla base di questo paradigma è che i bambini tendono ad osservare per tempi più lunghi gli stimoli nuovi (Fagan, 1977), quindi nella fase di

disabituazione una preferenza per lo stimolo nuovo può essere interpretata come una prova della capacità del bambino di discriminare fra le due quantità. In questo studio è stato dimostrato che i bambini sono in grado di discriminare tra grandi numerosità nel caso in cui il rapporto tra le quantità a confronto è di 0.50 (8 vs. 16) ma non nel caso in cui il rapporto è maggiore (8 vs. 12) (Fig. 5). La presenza di un rapporto limite sembra suggerire che il sistema di rappresentazione numerica dei bambini sia sensibile alla legge di Weber, come ipotizzato per gli adulti umani ed altre specie animali.

Questi risultati sono stati confermati da altri numerosi studi che hanno dimostrato come a 6 mesi di età i bambini siano in grado di discriminare molti confronti numerici che

hanno un rapporto di 0.50 ma non confronti con un rapporto maggiore, ad esempio sono in grado di discriminare 16 da 32 ma non 16 da 24 (Xu et al., 2005). I confronti con un rapporto più difficile (0.67) vengono discriminati solo da bambini più grandi, a 10 mesi di vita (Xu & Arriga, 2007), e questo ha portato ad ipotizzare che la precisione nella capacità di discriminare grandi numerosità aumenti durante l'infanzia. Numerosi studi hanno confermato quest'ipotesi e recentemente è stato dimostrato che la capacità di discriminare grandi quantità migliora progressivamente durante lo sviluppo fino ad arrivare all'età adulta in cui si è in grado di distinguere quantità tra cui vi è un rapporto numerico di 0.875 (Halberda & Feigenson, 2008)

I dati ottenuti attraverso la presentazione visiva degli stimoli sono stati replicati anche utilizzando stimoli sonori. Nello studio di Lipton e Spelke (2003) è stato evidenziato che bambini di 6 mesi di vita sono in grado di discriminare 8 vs. 16 suoni ma non 8 vs. 12, confermando a pieno i dati delle ricerche con stimoli visivi. Lo stesso esperimento è stato successivamente condotto su bambini di 9

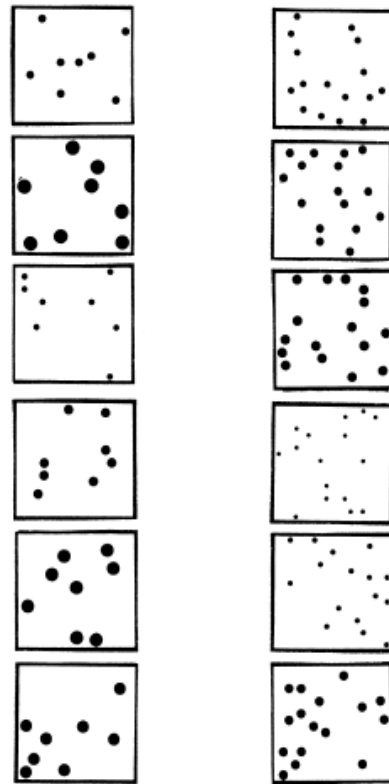


Fig. 5: Esempio di stimoli utilizzati da Xu e Spelke (2000)

mesi i quali sono stati invece in grado di discriminare 8 da 12 suoni. Questi risultati supportano l'ipotesi dell'esistenza di un meccanismo alla base delle capacità numeriche comune nei bambini e negli adulti e che questo sistema non sia modalità-specifico.

L'ipotesi di un sistema amodale sembrerebbe essere confermata anche da uno studio di Wood e Spelke (2005). Gli autori hanno indagato la capacità in bambini di 6 e 9 mesi di vita di discriminare tra diverse sequenze di azioni (salti di un pupazzo) sulla base della numerosità. I risultati mostrano che a 6 mesi i bambini sono in grado di discriminare 4 da 8 salti ma non 2 da 4 o 4 da 6, confronto che viene invece discriminato con successo a 9 mesi di vita. In linea con quelli ottenuti con la presentazione di stimoli visivi o sonori, anche questi dati sembrano quindi confermare l'ipotesi dell'esistenza di un sistema amodale innato per la rappresentazione astratta della numerosità.

Per quanto riguarda invece la discriminazione delle piccole numerosità, molti studi hanno evidenziato che fin dai primi giorni di vita i neonati sono in grado di distinguere stimoli formati da pochi elementi, sia quando gli stimoli sono presentati visivamente (Antell & Keating, 1983) sia quando si tratta di stimoli uditivi (Bijeljic-Babic et al., 1993). Un recente studio condotto con la tecnica dei potenziali evocati (ERPs) in neonati di 3 – 5 giorni di vita ha messo in luce la loro sensibilità all'informazione numerica quando vengono presentati stimoli sonori. I bambini ascoltavano sequenze formate da 4 toni, ognuno dei quali poteva avere una frequenza di 1000 o 1500 Hz. Nella maggior parte delle sequenze il confronto fra i toni con una determinata frequenza e quelli con l'altra era di 2 vs. 2 (condizione standard). Le restanti prove (target) invece potevano essere formate da tre toni con una determinata frequenza ed un tono con una frequenza diversa (3 vs. 1) oppure da quattro toni con la stessa frequenza (4 vs. 0). I potenziali evocati mostrano che i bambini sono in grado di discriminare la prova target solo quando questa differisce di almeno due elementi dalla condizione standard (ovvero nella condizione 4 vs. 0), mentre falliscono quando la differenza è di un solo elemento (target 3 vs. 1). I neonati sembrano quindi in grado di cogliere la differenza numerica tra piccole numerosità, ma solo quando questa è sufficientemente ampia (Ruusuvirta et al., 2009).

Così come per le grandi quantità, anche in questo caso le ricerche hanno adottato diversi paradigmi sperimentali e diversi tipi di stimoli. Wynn (1992) ha utilizzato la procedura della violazione dell'aspettativa. Questa prevede che i bambini siano familiarizzati con un evento: ad esempio un pupazzo viene inserito dietro ad uno schermo e quando lo schermo si abbassa il bambino può vedere il pupazzo. Nella fase di disabituazione al partecipante vengono mostrate due possibilità: una possibile (lo schermo si abbassa e vi è un pupazzo) ed una impossibile (lo schermo si abbassa e vi sono due pupazzi); se il bambino è in grado di distinguere i due eventi osserverà quello impossibile per più tempo. In questo studio a bambini di 5 mesi veniva presentato un oggetto a cui ne veniva aggiunto un altro, oppure due oggetti di cui uno veniva tolto. In seguito venivano mostrati due risultati dell'azione, uno corretto e l'altro impossibile. I soggetti hanno osservato più a lungo il risultato scorretto, e questo ci indica che i bambini erano consapevoli che un'azione, come togliere o aggiungere, porta ad un cambiamento nel numero di stimoli e che si aspettavano un preciso numero di oggetti dopo l'azione. I bambini di 5 mesi sembrano quindi conoscere le relazioni numeriche che vi sono tra piccole quantità di oggetti (Wynn, 1995).

Un altro paradigma utilizzato è quello della ricerca manuale (Feigenson & Carey 2003; Van de Walle et al., 2000) (Fig. 6). In questo caso lo sperimentatore inserisce in una scatola opaca un determinato numero di oggetti e il compito del bambino è quello di recuperare gli oggetti dal contenitore. Dopo aver inserito gli oggetti, lo sperimentatore ne toglie uno o più dal retro della scatola, in modo tale che il numero di oggetti che il

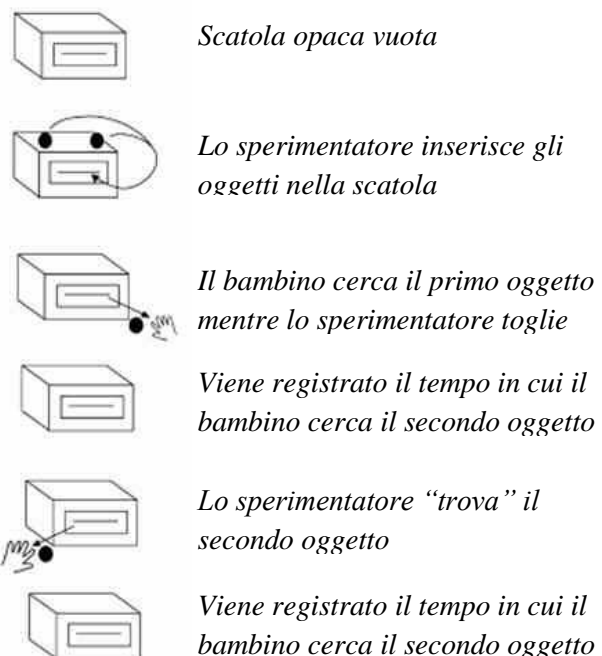


Fig.6: Procedura della ricerca manuale (Feigenson & Carey, 2003)

soggetto può recuperare sia diverso da quello che ha visto inizialmente. Viene quindi misurato il tempo che il bambino trascorre nel tentativo di trovare altri oggetti quando il contenitore dovrebbe essere vuoto, piuttosto che quando si aspetta che vi siano ancora degli oggetti. In uno studio condotto con questa procedura Feigenson e Carey (2005) hanno dimostrato come bambini di 10-12 mesi di vita siano in grado di discriminare tra 1 vs. 2 elementi, 2 vs. 3 e 1 vs. 3 ma falliscano nella discriminazione tra 1 vs. 4 elementi nonostante in quest'ultimo confronto il rapporto sia molto vantaggioso e comunemente facile da discriminare nel caso di grandi quantità. Questo dato confermerebbe che i bambini fanno uso di un sistema object-file in compiti che coinvolgono fino a 3 elementi, non sensibile al rapporto numerico tra le quantità presentate.

Vi sono inoltre alcune ricerche che sottolineano come bambini di qualche mese di vita siano in grado di cogliere la corrispondenza numerica tra stimoli presentati in diverse modalità. In particolare, bambini di 6-8 mesi sono stati sottoposti a test utilizzando una procedura di abituação-disabituação in cui venivano presentati visivamente insieme formati da 2 o 3 stimoli e contemporaneamente ascoltavano delle sequenze formate da 2 (o 3) suoni. I risultati mostrano che i soggetti osservano più a lungo lo schermo in cui il numero degli elementi corrisponde a quello dei suoni presentati: i bambini sono quindi in grado di estrarre l'informazione numerica da entrambi i tipi di stimoli (Starkey et al., 1983). Anche un recente studio (Joredes & Brannon, 2006) ha confermato l'abilità in bambini di pochi mesi di vita di far corrispondere stimoli di diversa natura in base all'informazione numerica. A bambini di 7 mesi venivano mostrati su due schermi i filmati dei volti di 2 o 3 donne riprese mentre parlavano, e contemporaneamente ascoltavano le voci di 2 (o 3) donne. Anche in questo caso i bambini hanno mostrato tempi di fissazione più lunghi per lo schermo in cui il numero di volti corrispondeva a quello delle voci. Il paradigma di questo lavoro si differenzia da quelli utilizzati in precedenza soprattutto per il tipo di stimoli utilizzati. Infatti in questo caso la connessione tra gli stimoli visivi e quelli uditivi non è arbitraria, dimostrando così la capacità dei bambini di combinare l'informazione numerica di stimoli presentati con modalità diverse all'interno di un contesto ecologico.

Nel complesso gli studi condotti sui bambini hanno portato a dei dati interessanti, sottolineando che alcune capacità numeriche emergono in fasi molto precoci dello sviluppo, ed alcune abilità sono già presenti in neonati di pochi giorni di vita. Tuttavia uno dei limiti della letteratura corrente è quello di aver utilizzato come unico modello di ricerca per gli studi ontogenetici l'essere umano. Il principale problema di questi studi è che bambini di diverse età devono essere sottoposti a test utilizzando paradigmi sperimentali differenti: è infatti molto complesso individuare una procedura che possa essere applicata allo stesso modo ai neonati e ai bambini in età verbale. Questo rende difficile il confronto fra i risultati ottenuti da studi su bambini di età diverse. Inoltre, viste le problematiche etiche/pratiche connesse alla ricerca sugli infanti è difficile poter compiere delle indagini esaustive su neonati di pochi giorni di vita. Infine non è possibile manipolare sperimentalmente l'esperienza e il contesto in cui si sviluppano i partecipanti, escludendo così la possibilità di indagare separatamente l'effetto della maturazione e dell'esperienza sullo sviluppo della cognizione numerica. Le stesse difficoltà pratiche rendono difficoltoso questo tipo di studio anche nei primati. Le recenti scoperte che anche organismi semplici come i pesci e gli insetti mostrano abilità numeriche simili a quelle dei primati potrebbe aprire la strada all'utilizzo di modelli sperimentali animali nello studio ontogenetico della cognizione numerica.

4. Il ruolo delle variabili continue

La capacità di effettuare giudizi di numerosità, ovvero saper scegliere quale tra due gruppi è il più o meno numeroso, non implica necessariamente che vi sia la capacità di contare. Diverse caratteristiche fisiche, chiamate comunemente variabili continue, covariano con la numerosità degli elementi ed è possibile che un animale utilizzi questo secondo tipo d'informazione nel compiere una scelta tra gruppi di oggetti. Ad esempio due insiemi di puntini bidimensionali di diversa numerosità differiranno tra loro anche per l'area degli elementi che li compongono, così come per la chiarezza complessiva o lo spazio totale che occupano i due insiemi. Di conseguenza, il giudizio di numerosità relativa

potrebbe essere basato ad esempio sulla quantità di area complessiva piuttosto che sul numero degli elementi presenti in ogni gruppo. Nel caso poi in cui gli stimoli siano organismi viventi, la quantità di movimento totale può variare tra i due gruppi e suggerire quale sia il più ampio. Risulta quindi evidente l'importanza di poter distinguere se alla base della discriminazione tra gruppi ci sia una discriminazione di quantità basata su fattori percettivi o invece una capacità di calcolo fondata sulla numerosità degli elementi.

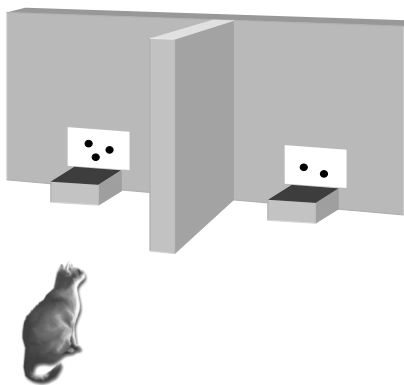


Fig. 7: *Rappresentazione schematica del setting sperimentale usato nella ricerca sul gatto domestico (Pisa & Agrillo, 2009).*

Ad esempio una recente ricerca ha documentato come esemplari di gatto domestico possano apprendere a distinguere tra insiemi composti da due e tre elementi bidimensionali al fine di raggiungere una fonte cibo (Fig. 7). Questo dato potrebbe essere interpretato come una prova a favore della capacità nei gatti di contare, ma in un successivo controllo in cui le variabili continue dei due gruppi venivano pareggiate, si è evidenziato come i soggetti facessero uso spontaneo di queste variabili, e in particolare

dell'area complessiva occupata dagli elementi, per distinguere tra i due insiemi piuttosto che del numero esatto di elementi (Pisa & Agrillo, 2009).

È stato quindi ipotizzato che discriminare due quantità basandosi sull'informazione numerica per gli animali possa essere difficile, e quindi avverrebbe solo quando nessun altro indicatore di quantità può essere utilizzato e il numero è l'unica informazione disponibile. Secondo questa interpretazione gli animali si affiderebbero al numero solo come "ultima risorsa" (Davis & Pérusse, 1988). Dati a favore di quest'ipotesi provengono da molti studi condotti con diverse specie. Questi studi dimostrano che gli animali nel compiere discriminazioni di quantità si affidano spontaneamente alle informazioni non numeriche, ovvero le variabili continue (Pisa & Agrillo, 2009; Krusche et al., 2010; Agrillo et al., 2008), oppure utilizzano il numero solo quando l'accesso ad altri indicatori di numerosità viene impedito (Breukelaar & Dalrymple-Alford,

1998; Kilian et al., 2003). Altre prove a sostegno di quest'ipotesi provengono dagli studi condotti sui bambini in età pre verbale. I bambini di 6–8 mesi di vita, ad esempio, per discriminare tra insiemi formati da piccole quantità di elementi sembrano affidarsi alle variabili continue piuttosto che all'informazione numerica. Nello studio di Clearfield e Mix (1999) i soggetti venivano abituati ad uno stimolo formato da un numero costante di elementi (2 o 3) e con perimetro totale costante. Nella fase di disabituazione invece venivano mostrati sia stimoli in cui cambiava il numero di elementi sia stimoli con un perimetro totale differente. I soggetti hanno osservato più a lungo gli stimoli con un nuovo perimetro totale, mentre non sono emerse differenze per gli stimoli con una nuova numerosità. Questi risultati suggeriscono quindi che i bambini si affidino alle variabili continue piuttosto che al numero per discriminare due stimoli. Poiché il perimetro totale correla con l'area e la chiarezza complessive, e con lo spazio totale occupata dagli elementi i dati di questo lavoro non permettono di identificare quale tra le variabili continue venga utilizzata.

Infine, in talune condizioni in cui viene impedito l'accesso alle informazioni simboliche verbali, anche gli esseri umani adulti a cui viene richiesto di determinare rapidamente il numero di punti sullo schermo si basano primariamente su proprietà visive quali l'area o la densità per stimare quale insieme è più numeroso (Durgin, 1995; Vos et al., 1988). La spiegazione tradizionale fornita per l'ipotesi dell'ultima risorsa è che i numeri richiedano un tipo di elaborazione più complessa rispetto a quella basata sulle variabili continue, per cui le variabili continue sarebbero più facili da processare e, di conseguenza, più veloci da essere utilizzate.

Tuttavia recentemente nuovi studi hanno messo in discussione quest'ipotesi, infatti alcune ricerche hanno dimostrato che in alcune condizioni l'informazione numerica può essere elaborata automaticamente. Cantlon e Brannon (2007b) hanno condotto uno studio su dei macachi per indagare il ruolo del numero e delle variabili continue nei compiti di discriminazione numerica. I soggetti venivano addestrati in un compito di match-to-sample in cui lo stimolo di riferimento e la scelta corretta erano uguali per la numerosità e una tra le variabili continue, mentre la scelta incorretta era diversa sia per numerosità che per un'altra

variabile. Una volta raggiunto un criterio di apprendimento si passava alla fase test in cui la scelta era tra uno stimolo che corrispondeva allo stimolo di riferimento per il numero ed un secondo stimolo che invece corrispondeva per una variabile continua. I risultati mostrano che le scimmie elaborano spontaneamente l'informazione numerica nonostante le variabili continue fossero potenzialmente disponibili. Inoltre quando numeri e variabili continue forniscono informazioni contrastanti, utilizzano di preferenza le informazioni numeriche tutte le volte che il rapporto numerico risulta favorevole.

Altri dati sulla stessa linea provengono dagli studi condotti sui bambini. È stato trovato che i bambini di sei mesi non utilizzano l'informazione numerica come ultima risorsa nel distinguere tra gruppi di punti che differiscono anche per le variabili continue (Cordes & Brannon, 2008a). Inoltre è stato dimostrato che in alcune circostanze per bambini di 8-9 anni potrebbe essere più difficile elaborare le variabili continue piuttosto che la numerosità quando gli oggetti differiscono per grandezza (Iuculano et al., 2008). Un recente lavoro ha dimostrato che anche gli esseri umani adulti possono affidarsi automaticamente all'informazione numerica. Dei soggetti sono stati sottoposti ad uno Stroop test in cui venivano presentati degli insiemi di pallini che potevano variare sia per numerosità che per le variabili continue e veniva richiesto di stimare quale fosse il più numeroso o quale fosse quello con un'area cumulativa maggiore. I risultati mostrano che la prestazione in entrambi i compiti peggiora quando le informazioni sono contrastanti. Ciò significa che le variabili continue sono elaborate automaticamente anche quando non sono necessarie per risolvere il compito. Allo stesso modo l'informazione numerica viene elaborata spontaneamente anche quando il compito prevede di valutare gli stimoli solo in base alle variabili continue. Questo ci suggerisce che gli esseri umani adulti non sono in grado di ignorare l'informazione numerica durante la rappresentazione di quantità non simboliche (Nys & Content, 2011).

Nel complesso questi studi non forniscono una chiara indicazione se l'elaborazione del numero sia cognitivamente più impegnativa rispetto all'elaborazione delle variabili continue degli stimoli. Sebbene vari studi riportino che gli animali utilizzano il numero come ultima risorsa, altre prove sperimentali

supportano l'idea che gli animali possano elaborare l'informazione numerica e non numerica automaticamente, apparentemente con lo stesso sforzo, e fare un uso spontaneo della numerosità.

Limitare l'accesso e l'utilizzo delle variabili continue è quindi essenziale nei test di laboratorio al fine di capire se l'animale osservato sia in grado realmente di elaborare il numero o se al contrario stia facendo uso di strategie alternative basate appunto sulle variabili continue.

Un primo metodo per controllare che il soggetto sia in grado di distinguere il gruppo più grande sulla base di un processo di addizione degli elementi piuttosto che in base a componenti non numeriche consiste nella procedura di pareggiamento di queste variabili tra il gruppo più grande e quello più piccolo. Ad esempio Xu e Spelke (2000) hanno dimostrato come bambini di sei mesi di vita siano in grado di distinguere 8 elementi da 16 anche quando le variabili continue sono pareggiate tra i due gruppi-stimolo. In dettaglio ciascuna coppia di stimoli veniva pareggiata per l'area complessiva degli elementi e la loro densità. Inoltre i punti venivano presentati in diverse posizioni dello spazio, in modo tale da evitare che la discriminazione avvenisse sulla base di caratteristiche globali dello stimolo (come la forma complessiva) piuttosto che sulla numerosità degli elementi.

Un altro metodo comunemente usato per il controllo delle variabili percettive prende il nome di "presentazione sequenziale degli stimoli". L'utilizzo di questa procedura in modelli animali è stato introdotto da Hauser (Hauser et al., 2000). Questo metodo prevede che lo sperimentatore inserisca sotto lo sguardo diretto dell'animale i singoli elementi all'interno di due diversi contenitori opachi che non permettono all'animale di avere una visione simultanea dei due gruppi-stimolo nella loro interezza, riducendo così l'accesso alle informazioni non numeriche dei due gruppi. Risulta quindi difficile ipotizzare che l'animale utilizzi le variabili continue (area, volume, etc.) per poter risolvere il compito. Inoltre lo sperimentatore impiega lo stesso tempo per riempire i contenitori al fine di pareggiare la quantità di tempo spesa accanto al recipiente contenente il gruppo più numeroso e quello contenente la minore quantità di cibo. Beran e Beran (2004) hanno utilizzato questa procedura in uno studio condotto sugli scimpanzé. Gli sperimentatori inserivano sequenzialmente i pezzi di banana all'interno di due

diversi contenitori in modo tale che il soggetto non fosse in grado di vedere il quantitativo di frutta complessivamente inserito. I risultati mostrano che gli scimpanzé sono in grado di sommare spontaneamente sia piccole quantità, individuando l'insieme più numeroso quando sono messe a confronto 1 rispetto a 2 banane, 2 vs. 3 e 3 vs. 4, sia quantità maggiori e cioè 5 vs. 10 e 6 vs. 10 banane. Lo stesso metodo di ricerca è stato utilizzato anche in altre specie animali. Negli uccelli è stato condotto uno studio in ambiente naturale sul pettirosso della Nuova Zelanda (Hunt et al., 2008). Alcune larve della farina venivano nascoste in maniera sequenziale dietro due differenti foglie artificiali in modo che non fosse mai simultaneamente visibile il numero totale di prede presenti dietro ogni foglia. Successivamente lo sperimentatore si allontanava e si osservava verso quale foglia



Fig. 8: *Setting sperimentale utilizzato da Hunt e colleghi (2008) sulle capacità numeriche dei pettirossi.*

il pettirosso si avvicinava per raggiungere il cibo. Gli animali sono stati in grado di scegliere il gruppo più numeroso in confronti numerici quali 1 vs. 2, 2 vs. 3, 3 vs. 4 e 4 vs. 8 rivelando la capacità di memorizzare e confrontare mentalmente le informazioni ricavate dalla presentazione sequenziale di cibo (Fig.8).

5. La cognizione numerica nei pesci

Recentemente la cognizione numerica è stata indagata anche nei pesci, che da tempo sono un valido modello sperimentale per lo studio del comportamento sociale e della cognizione animale (Brown & Laland, 2003). Alcuni esperimenti sono stati condotti utilizzando il paradigma della scelta spontanea, altri con la tecnica dell'addestramento.

Uno studio condotto sul teleosteo *Gambusia holbrooki* (Agrillo et al., 2008) ha indagato la preferenza spontanea per il gruppo di conspecifici più numeroso attraverso un test in cui i soggetti sperimentali venivano posti in un ambiente sconosciuto, senza luoghi di riparo e perciò potenzialmente pericoloso (Fig. 9). È noto che in presenza di potenziali rischi di predazione i pesci appartenenti a specie sociali tendono a ricongiungersi al gruppo di compagni più numeroso per ridurre la probabilità di essere catturati (Agrillo & Dadda, 2007; Buckingham et al., 2007; Hager & Helfman, 1991). Questa tendenza spontanea ad avvicinarsi al gruppo più numeroso è stata alla base della ricerca in questione. Il soggetto veniva inserito e lasciato libero di nuotare in una vasca alle estremità della quale erano visibili due gruppi di conspecifici di diversa numerosità. La variabile dipendente era il tempo che il soggetto trascorrevva a ridosso del gruppo-stimolo contenente il maggior numero di individui. I risultati di questa ricerca hanno mostrato che se i gruppi-stimolo differivano tra loro di una sola unità i pesci trascorrevano più tempo verso l'insieme più numeroso nei confronti 1 vs. 2,

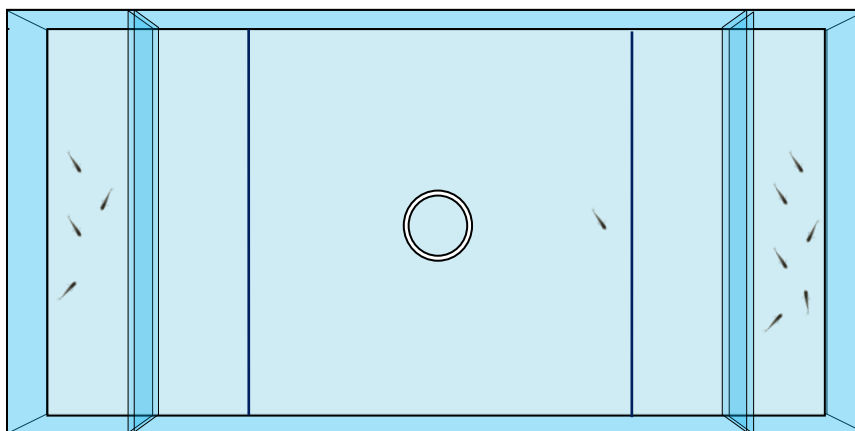


Fig. 9: Schema dell'apparato sperimentale (Agrillo et al., 2008). Un pesce viene posto isolatamente al centro di un ambiente sconosciuto e due gruppi di compagni di diversa numerosità sono visibili alle due estremità dell'apparato.

2 vs. 3 e 3 vs. 4, ma non nei confronti 4 vs. 5, 5 vs. 6, 6 vs. 7 e 7 vs. 8. La capacità di compiere discriminazioni fini è quindi presente solo quando il gruppo maggiore è composto da un massimo di 4 elementi. I soggetti sono stati in grado di distinguere tra gruppi formati da più di quattro elementi solamente quando il rapporto numerico tra i due insiemi era uguale o minore a 0.50 (4 vs. 8, 8 vs. 16 e 4 vs. 10). Questi primi esperimenti sono stati seguiti da altri in cui si è indagato il ruolo delle variabili continue nella discriminazione del gruppo più numeroso. In un primo esperimento di controllo è stato indagato il ruolo dell'area complessiva occupata dagli stimoli. La procedura sperimentale è rimasta invariata rispetto allo studio sopra descritto e sono stati utilizzati due confronti numerici in cui era stata evidenziata una preferenza significativa verso il gruppo più numeroso (2 vs. 3 e 4 vs. 8). Gli individui stimolo venivano scelti in base alla loro dimensione corporea in modo che la superficie totale occupata dai due gruppi-stimolo fosse identica, indipendentemente dalla loro numerosità. Tenendo sotto controllo questa variabile, i soggetti non sono riusciti a distinguere il gruppo più numeroso in nessuno dei due confronti proposti, evidenziando così che quando si tratta di dover distinguere tra quantità i pesci sembrano basare la loro decisione sulla superficie totale dell'area occupata. In un secondo esperimento è stato indagato il ruolo della quantità di movimento. Per controllare questa variabile è stata manipolata la temperatura dell'acqua, infatti è noto che nei pesci ad una diminuzione della temperatura corrisponde una diminuzione dell'attività motoria e viceversa (Pritchard et al., 2001). Al fine di pareggiare la quantità complessiva di movimento tra i due gruppi, il meno numeroso è stato inserito in una vasca in cui l'acqua veniva mantenuta ad una temperatura di 29 ± 1 °C, mentre per il gruppo più numeroso l'acqua era mantenuta a 19 ± 1 °C. I risultati hanno evidenziato come i pesci siano stati in grado di distinguere il gruppo più numeroso nel confronto 2 vs. 3 ma non abbiano mostrato una preferenza statisticamente significativa nel confronto 4 vs. 8, suggerendo che l'informazione ricavata dalla quantità di movimento sia utilizzata dai pesci nella discriminazioni di grandi quantità. In conclusione, questo studio sembrerebbe suggerire nei pesci l'esistenza di due distinti sistemi numerici: uno per le piccole numerosità, preciso e il cui limite sarebbe di 4 unità, e uno per le grandi numerosità, in cui il rapporto

numerico tra le quantità a confronto influenza il comportamento dei soggetti. Per poter confermare quest'ipotesi sono però necessari nuovi studi più approfonditi, in cui venga valutata la prestazione anche in altri confronti numerici all'interno dei piccoli e dei grandi numeri, in modo da poter valutare se il rapporto numerico gioca un ruolo diverso nella capacità di discriminazione di quantità nei due range. Inoltre questi risultati sembrano indicare che i pesci utilizzino spontaneamente e preferenzialmente le variabili continue come indicatori di numerosità, tuttavia questo non permette di trarre delle conclusioni definitive sulla capacità di contare nei pesci. Infatti questi dati non escludono la possibilità che sotto altre condizioni i pesci si affidino all'informazione numerica per discriminare il gruppo più numeroso.

Una successiva ricerca condotta sulla stessa specie ha utilizzato una procedura di addestramento (Agrillo et al., 2009). Esemplari adulti di *Gambusia holbrooki* sono stati inizialmente addestrati a discriminare tra due set di figure bidimensionali (2 vs. 3 elementi). Il soggetto veniva inserito all'interno di un contenitore cubico alle cui estremità vi erano due corridoi che lo collegavano con una vasca esterna dove si trovava della vegetazione e dei conspecifici che fungevano da rinforzo sociale. Sopra ciascuna porta erano posti gli stimoli, e solo la porta associata alla numerosità rinforzata permetteva al soggetto di uscire e ricongiungersi ai propri compagni. Negli stimoli utilizzati durante la fase di addestramento nessuna variabili continua era stata controllata. L'esperimento prevedeva poi una fase test che avveniva in estinzione, ovvero ai soggetti non era data la possibilità di uscire nella vasca esterna. In questa fase negli stimoli utilizzati le variabili continue erano controllate una per volta. Utilizzando questa procedura ci si aspetta che se durante l'addestramento i soggetti si sono affidati ad una variabile continua, nella fase test quando gli stimoli sono pareggiati per questa variabile la loro prestazione scenda al livello del caso. Dai risultati è emerso che la chiarezza totale degli stimoli e la somma dei perimetri sono irrilevanti, infatti non hanno modificato la prestazione dei pesci, mentre quando gli stimoli erano pareggiati per area oppure per lo spazio occupato dalle due configurazioni la prestazione dei soggetti diventava casuale, suggerendo così che questi due tipi di informazioni continue venissero utilizzati spontaneamente dai

pesci durante il processo di apprendimento. Infine, in un test di controllo in cui tutte le variabili continue venivano simultaneamente controllate fin dalla fase di addestramento, si è potuto verificare che i pesci erano in grado di operare discriminazioni quantitative basandosi esclusivamente sull'informazione numerica. Questo studio quindi sottolinea come i pesci nell'apprendere discriminazioni tra piccole quantità si affidino spontaneamente alle variabili continue, ma non permette di concludere che l'elaborazione dell'informazione numerica sia cognitivamente più difficile.

6. Obiettivi della tesi

La presente ricerca ha indagato le competenze numeriche nei pesci, utilizzando due diversi modelli sperimentali (*Poecilia reticulata* e *Gambusia holbrooki*) che erano già stati impiegati in precedenti studi sulla cognizione numerica nei pesci (Agrillo et al., 2008, 2009).

In particolare, sono stati approfonditi cinque diversi aspetti della cognizione numerica. In primo luogo sono stati condotti degli esperimenti allo scopo di valutare se nei pesci siano presenti due sistemi numerici indipendenti per l'elaborazione dei piccoli e dei grandi numeri o se entrambi i range numerici siano elaborati dallo stesso sistema. Una delle principali differenze tra i due sistemi numerici proposti in letteratura è la dipendenza dal rapporto numerico, infatti il sistema per i piccoli numeri sarebbe indipendente dal rapporto, mentre quello per i grandi ne sarebbe fortemente influenzato. I pesci sono quindi stati sottoposti ad un test di scelta spontanea in cui sono stati presentati confronti con gli stessi rapporti numerici all'interno di entrambi i range. Il presupposto di questo esperimento è che se realmente il rapporto numerico ha un ruolo solamente nelle grandi quantità, allora la prestazione dovrebbe migliorare all'aumentare della distanza numerica solo in presenza di grandi quantità. Gli stessi confronti numerici sono stati presentati anche a degli studenti universitari per poter fare un confronto diretto tra le caratteristiche dei sistemi numerici non verbali dei pesci e degli esseri umani adulti. Inoltre è stato condotto un secondo esperimento in cui è stata valutata la capacità dei pesci di discriminare tra due quantità di cui una appartenente ai piccoli numeri e una ai grandi. In letteratura l'incapacità di risolvere questo tipo di confronto viene considerata come una prova a favore dell'esistenza di due sistemi numerici indipendenti.

Il secondo aspetto che è stato indagato riguarda l'ontogenesi. Come già descritto nell'introduzione in letteratura lo sviluppo ontogenetico delle abilità numeriche è stato studiato unicamente negli esseri umani. Un primo obiettivo di questa serie di esperimenti era quindi di colmare questo vuoto, andando ad indagare le abilità numeriche nei pesci fin dalle prime fasi dello sviluppo. Sono stati presentati due diversi confronti numerici, uno appartenente al range dei

piccoli numeri ed uno appartenente a quello dei grandi, allo scopo di valutare se lo sviluppo della capacità di discriminazione di quantità avvenga allo stesso modo per tutte le numerosità. Inoltre l'utilizzo dei pesci come modello sperimentale ha permesso anche di studiare separatamente il ruolo della maturazione e dell'esperienza nello sviluppo delle capacità numeriche sottoponendo a test pesci di diversa età con o senza esperienza di gruppi di conspecifici.

Un terzo punto riguarda il ruolo delle variabili continue. Uno studio precedente aveva messo in luce che i pesci in test di scelta spontanea tra due gruppi di conspecifici si affidano ad alcuni indicatori indiretti di numerosità come la quantità di movimento totale e l'area cumulativa (Agrillo et al., 2008). È stato quindi condotto un esperimento allo scopo di indagare se quando viene limitato l'accesso a queste variabili i pesci sono in grado di discriminare il gruppo più numeroso basandosi unicamente sull'informazione numerica. L'apparato sperimentale utilizzato comunemente nei test di scelta spontanea è stato modificato rendendo gli stimoli visibili solo uno per uno e impedendo la possibilità di vedere il gruppo nella sua completezza e di conseguenza di utilizzare le variabili continue. L'esperimento è stato condotto su soggetti di diversa età allo scopo di valutare se quest'abilità sia presente fin dalle prime fasi dello sviluppo.

Gli esperimenti precedenti e altri studi presenti in letteratura (Agrillo et al., 2009) hanno dimostrato che i pesci sono in grado di compiere delle discriminazioni fra diverse quantità affidandosi all'informazione numerica, ma lo fanno solo quando le variabili continue vengono controllate. Nel quarto progetto della tesi è stato quindi condotto un esperimento allo scopo di verificare se il numero richieda una maggior complessità di elaborazione rispetto alle variabili continue. Per verificare quest'ipotesi i pesci sono stati addestrati a discriminare tra due e tre elementi in tre differenti condizioni. In una condizione potevano utilizzare unicamente l'informazione numerica; nella seconda potevano utilizzare unicamente le variabili continue, mentre nella terza avevano a disposizione sia le informazioni numeriche che quelle continue. Se l'informazione numerica è davvero più difficile da elaborare, ci si attende un maggior numero di prove per apprendere il compito quando la sola informazione numerica è disponibile rispetto

alla condizione in cui le variabili continue o entrambi i tipi d'informazione sono disponibili.

Infine, nella quinta parte sono stati condotti una serie di esperimenti con lo scopo di approfondire le caratteristiche del sistema per l'elaborazione dei grandi numeri. Un primo esperimento ha indagato quali variabili vengano utilizzate dai pesci per apprendere una discriminazione fra grandi quantità quando sia l'informazione numerica che le variabili continue sono potenzialmente disponibili. Nel secondo esperimento invece i pesci sono stati addestrati ad apprendere una discriminazione tra grandi quantità mentre tutte le variabili continue venivano controllate simultaneamente, verificando così se l'apprendimento è possibile anche quando è presente solo l'informazione numerica. Successivamente è stato indagato se vi sia un limite superiore nel numero di elementi che possono essere elaborati dai pesci. I soggetti sono stati addestrati ad apprendere confronti fra quantità molto grandi ed è stato valutata l'influenza della numerosità totale sulla prestazione. Inoltre in un ulteriore test è stato valutata l'influenza del rapporto numerico sull'apprendimento di discriminazioni fra grandi numeri. Infine, un ultimo esperimento è stato condotto su un gruppo di studenti universitari, utilizzando gli stessi stimoli impiegati negli esperimenti con i pesci, allo scopo di confrontare le caratteristiche del sistema dei grandi numeri dei pesci con quello degli esseri umani.

2. Parte sperimentale

1. La specie

In questo progetto sono stati utilizzati due diverse specie di piccoli pesci d'acqua dolce: *Poecilia reticulata* e *Gambusia holbrooki*. Entrambe le specie erano già state impiegate in precedenti studi sulla cognizione numerica (Agrillo et al., 2008; 2009).

Poecilia reticulata

Poecilia reticulata, comunemente detta “guppy”, in onore del suo studioso John L. Guppy, è un teleosteo appartenente alla famiglia Poeciliidae, originario dell’America centro-meridionale.

L’habitat di questa specie è molto vario grazie alle ampie capacità di adattamento a diverse condizioni di salinità (Chervinski, 1984). Sono pesci tropicali di acqua dolce o salmastra che vivono mediamente tra i 18 e i 28 °C. L’habitat naturale è rappresentato da pozze d’acqua calme, limpide e poco profonde che si trovano lungo il corso di torrenti con vegetazione in genere non particolarmente abbondante e fondo ghiaioso multicolore.

È una specie onnivora che si ciba di larve di insetti, di invertebrati e di vegetali.

Poecilia reticulata presenta dimorfismo sessuale inverso (Fig. 10). Le femmine possono raggiungere i 6 cm di lunghezza, hanno il corpo arrotondato e



Fig. 10: Un esemplare femmina e un esemplare maschio di *Poecilia reticulata*

pinne ampie. I maschi sono più piccoli e raggiungono al massimo i 3.5 cm di lunghezza. La livrea maschile è più appariscente di quella femminile: al medesimo colore di fondo grigio-bruno si aggiungono macchie nere, arancioni e iridescenti.

Come la maggior parte dei poecilidi, *Poecilia reticulata* è una specie a fecondazione interna, ovovivipara, e il sistema di accoppiamento è promiscuo. La fecondazione avviene per accoppiamento diretto fra i due sessi: il maschio possiede una pinna anale modificata in una struttura allungata, detta gonopodio, che funge da organo copulatore mobile, adatto ad inseminare direttamente la femmina. Con un solo accoppiamento una femmina può fecondare fino a tre covate; la gestazione dura dalle quattro alle sei settimane e gli avannotti, il cui sacco vitellino si consuma entro poche ore dal parto, sono già indipendenti alla nascita, in grado cioè di nuotare e di nutrirsi da soli. Proprio per questa caratteristica di specie precoce *Poecilia reticulata* può rappresentare un modello di ricerca ideale per gli studi ontogenetici. La maturità sessuale viene raggiunta tra i 2 e i 3 mesi di età.

In natura *Poecilia reticulata* tende a formare branchi di numerosità variabile, la cui composizione è determinata su media scala dalla separazione tra gli habitat e su piccola scala da eventi continui di fissione e fusione tra branchi diversi (Croft et al., 2006).

Gambusia holbrooki

Gambusia holbrooki è un teleosteo d'acqua dolce appartenente alla famiglia dei Poeciliidae originario del Nord America (Fig. 11). La sua originaria



Fig. 11: Un esemplare adulto di *Gambusia holbrooki*

zona di diffusione si estende dal New Jersey alla Florida e dal bacino del Messico al sud della Georgia. *Gambusia holbrooki* è stata introdotta in Italia circa un secolo fa (Dulzetto, 1928) in diverse zone malariche a scopo antianofelico, poiché questa specie tende a nutrirsi di larve di

zanzare. Per questo motivo al nome *Gambusia* è stata quindi aggiunta anche l'etichetta inglese "mosquitofish", che rappresenta oggi il nome più comune con il quale la specie è nota in ambito internazionale.

Le dimensioni corporee di questa specie sono molto variabili: si osserva infatti un range che va da 1 cm sino a 5 cm. Per quanto concerne il comportamento, *Gambusia holbrooki* si riunisce frequentemente in gruppi: mentre il comportamento dei maschi è variabile e fortemente influenzato dalla presenza di potenziali partner nel gruppo, le femmine formano in natura gruppi variabili che possono andare da 2 a 10 o più individui e si possono incontrare aggregati composti da sole femmine (Bisazza & Marin, 1995).

A seguito della sua ampia distribuzione e la relativa facilità di gestione in cattività è diventato uno dei modelli sperimentali di ricerca comunemente utilizzati nello studio della biologia e del comportamento dei teleostei (Hoysak & Godin, 2007; Smith, 2007).

2. I sistemi numerici pre verbali

In letteratura è generalmente accettata l'esistenza di un sistema per l'elaborazione approssimativa di grandi quantità, chiamato analog magnitude. Nella specie umana è stata ipotizzata la presenza anche di un secondo sistema, object-file, che permette un'elaborazione precisa delle piccole quantità. Alcuni autori ritengono che gli animali possiedano unicamente il sistema dell'analog magnitude e che esso sia valido su tutta la scala numerica; altri propongono anche negli animali l'esistenza del sistema object-file, il quale opererebbe esclusivamente sulle quantità inferiori a 3 o 4 unità. Una delle principali caratteristiche che differenzia i due sistemi è la loro dipendenza dal rapporto numerico, infatti nel sistema dei grandi numeri la prestazione è fortemente influenzata dal rapporto che intercorre tra le quantità messe a confronto, mentre nel sistema object-file questo non avviene.

2.1 Esperimento 1. Il ruolo del rapporto numerico: un confronto tra pesci e esseri umani

Come accennato nell'introduzione, alcuni esperimenti hanno suggerito l'esistenza nei pesci di due meccanismi distinti deputati alle analisi di quantità, uno attivo per compiti che coinvolgono la discriminazione tra piccole numerosità, l'altro per compiti con grandi numerosità (Agrillo et al., 2008). Poiché il segno distintivo dell'analog magnitude è che la prestazione varia in base al rapporto secondo la legge di Weber, indagare il ruolo del rapporto numerico nella capacità di discriminare piccoli e grandi numeri potrebbe fornire ulteriori evidenze a favore dell'esistenza di due sistemi separati per l'elaborazione di quantità appartenenti ai due diversi range (Revkin et al., 2008).

Lo scopo di questo esperimento è quindi quello di verificare se e come il valore del rapporto numerico che intercorre tra le due numerosità messe a confronto influisca in modo diverso sull'accuratezza nei due differenti range numerici. Inoltre, allo scopo di valutare se i sistemi numerici presenti nell'uomo siano condivisi anche dagli altri vertebrati, gli stessi confronti numerici sono stati

presentati anche a soggetti umani adulti. In questo modo è stato possibile confrontare direttamente la capacità di discriminare diverse quantità dei pesci con quella di studenti universitari.

2.1.1 Pesci

Nel presente esperimento è stato condotto un test di scelta spontanea, in cui sono stati presentati i seguenti confronti numerici, suddivisibili in due blocchi: 1 vs. 4, 1 vs. 3, 1 vs. 2, 2 vs. 3, e 3 vs. 4 per il range dei piccoli numeri, e 4 vs. 16, 4 vs. 12, 4 vs. 8, 4 vs. 6, e 6 vs. 8 per il range dei grandi numeri. Quindi per entrambi i range nei confronti proposti i valori del rapporto erano nell'ordine: 0.25, 0.33, 0.50, 0.67, e 0.75.

L'esperimento è stato condotto sia in femmine adulte di *Poecilia reticulata* con esperienza sociale, sia in avannotti della stessa specie privi di esperienza di gruppo. Per questa seconda condizione il confronto nel range dei piccoli numeri è stato studiato in individui di 24 ore, mentre quello dei grandi numeri con pesci di 40 giorni di vita. La necessità di sottoporre al test pesci di differenti età nasce dalle evidenze riportate negli esperimenti successivi (esperimento 3) che dimostrano come il sistema di discriminazione per le piccole numerosità sia innato e presente dalla nascita in maniera completa mentre la capacità di distinguere tra numerosità maggiori compaia nel periodo successivo alla nascita, in particolare a 40 giorni di età, in individui che non hanno avuto esperienza di gruppi di conspecifici.

Infine allo scopo di verificare se, a parità di rapporto numerico tra le due numerosità confrontate, esista una differenza nella prestazione in confronti che coinvolgono il range delle piccole numerosità o quello delle grandi numerosità, è stato aumentato il campione per il rapporto 0.67, sottoponendo a test 64 ulteriori femmine adulte di *Poecilia reticulata*, 32 nel confronto 2 vs. 3 (piccoli numeri) e 32 nel confronto 4 vs. 6 (grandi numeri).

Soggetti sperimentali

Il campione sperimentale si suddivide in due gruppi: pesci giovani senza esperienza di gruppo e pesci adulti con normale esperienza sociale.

Pesci giovani senza esperienza di gruppo

Il primo gruppo, “pesci giovani”, era costituito da pesci di 24 ore di vita e pesci di 40 giorni di vita. I primi sono stati utilizzati per i confronti numerici relativi al range dei piccoli numeri; sono stati sottoposti a test un totale di 100 individui, 20 per ogni confronto numerico. Analogamente per i confronti relativi al range dei grandi numeri sono stati utilizzati un totale di 100 soggetti, 20 per ogni confronto.

Le femmine gravide prossime al parto venivano stabulate singolarmente in vasche di stoccaggio di dimensione 50 x 25 x 18 cm della capienza di 20 litri, illuminate da una lampada al neon da 36 Watt e isolate visivamente l’una dall’altra. Durante il giorno ispezioni regolari venivano effettuate al fine di verificare l’eventuale nascita degli avannotti. Al termine del parto gli avannotti venivano raccolti e stabulati a coppie in vasche di dimensione 32 x 19 x 16 cm. La temperatura dell’acqua era mantenuta a 25 ± 2 °C. Le vasche erano munite di sistema di illuminazione con un fotoperiodo di 12 ore (08:00-20:00). Il fondo era ricoperto da ghiaio per acquari e per migliorare le condizioni di mantenimento era stata disposta vegetazione naturale (*Vesicularia dubyana*). I pesci venivano nutriti tre volte al giorno con mangime in scaglie (Sera GVG-Mix) e nauplii di *Artemia salina*. La scelta di mantenere i soggetti in coppie piuttosto che isolati singolarmente è stata motivata dalla necessità di migliorare le loro condizioni ambientali e sociali durante le fasi precedenti al momento del test, evitando le possibili conseguenze negative della deprivazione sensoriale e sociale ma contemporaneamente impedendo la possibilità di avere in alcun modo esperienza di gruppi sociali. La presenza di un solo compagno infatti non consentiva di operare nessuna scelta sociale in funzione della numerosità dei pesci né tantomeno di contare il numero di conspecifici.

Gli stimoli utilizzati durante il test avevano la stessa età, dimensione e condizioni di stabulazione dei soggetti. Ciascun soggetto sperimentale è stato sottoposto al test una sola volta. Al contrario gli stimoli sono stati utilizzati più volte nel corso degli esperimenti.

Tutti i soggetti appartenenti a questo gruppo non erano ancora differenziati sessualmente.

Pesci adulti con normale esperienza sociale

Il secondo gruppo, “pesci adulti”, era costituito da femmine adulte di *Poecilia reticulata* allevate in condizione di esperienza sociale in gruppi di circa 15 individui, di cui 3-4 maschi, stabulate in vasche da 60 litri. La scelta di utilizzare come soggetti solo individui di sesso femminile è stata dettata dalla tendenza fortemente gregaria delle femmine dei Poeciliidae riportata in letteratura in test di scelta spontanea (Agrillo et al., 2008). Ai fini dell’esperimento sono state sottoposti a test 14 individui per ogni confronto numerico, sia per le piccole che per le grandi numerosità.

Tutti i pesci sono stati stabulati in acqua dolce, mantenuta alla temperatura di 25 ± 2 °C, in vasche munite di sistema filtrante ed impianto di illuminazione (lampada al neon da 36 W) con un fotoperiodo di 12 ore (08:00-20:00). Il fondo era ricoperto da ghiaio per acquari e per migliorare le condizioni di mantenimento era stata disposta vegetazione artificiale e naturale (*Vesicularia dubyana*). I pesci venivano nutriti tre volte al giorno con mangime in scaglie (Sera GVG-Mix) e nauplii di *Artemia salina*.

In tutti i test, i soggetti sono stati sottoposti ad osservazione una sola volta nel corso della ricerca; al contrario gli stessi stimoli sono stati utilizzati più volte durante gli esperimenti. Anche gli stimoli erano di sesso femminile e della medesima età dei soggetti.

Apparato sperimentale

Pesci giovani senza esperienza di gruppo

Per i pesci a 24 ore di vita è stata utilizzata una modifica dell’apparato sperimentale adoperato in precedenti studi di scelta spontanea (Agrillo et al., 2008; Buckingham et al., 2007). L’apparato era costituito da una vasca suddivisa in tre settori adiacenti; il settore centrale – chiamato in seguito “area del soggetto” – era di dimensioni 20 x 17.5 x 25 cm (Fig. 12). Le pareti laterali e il fondo erano rivestite di poliplack bianco, mentre i restanti lati erano di vetro sintetico. Alla distanza di 1 cm dalle pareti di vetro, erano posizionati i due settori laterali, chiamati “area degli stimoli” Questi erano costituiti da pareti di vetro sintetico trasparente che formavano tra loro un semiottagono di 6.3 cm di lato. Ciascuna area degli stimoli era illuminata da una lampada al neon da 8W posta a 25 cm di

altezza rispetto al fondo. Il fondo dei tre settori, inoltre, era stato ricoperto di una rete bianca di 0.1 x 0.1 cm di lato.

Al di sotto dei settori, lungo tutta la lunghezza della vasca, era posizionato un parallelepipedo di poliplack bianco. Sulla superficie in corrispondenza dei tre diversi settori erano presenti dei fori che permettevano la circolazione dell'acqua e favorivano la comunicazione olfattiva tra le aree degli stimoli e l'area del soggetto, in modo da evitare indizi olfattivi.

Durante l'esperimento l'apparato veniva riempito con 4 cm di acqua mantenuta alla temperatura di 25 ± 2 °C.

Un apparato identico è stato utilizzato per i pesci a 40 giorni di vita. Le uniche differenze riguardano la dimensione delle aree degli stimoli, i cui lati erano lunghi 8.3 cm, e il livello dell'acqua che è stato alzato a 6 cm.

Una videocamera, posta a circa 1 m di altezza sopra l'apparato, permetteva la registrazione del comportamento del soggetto per tutta la durata dell'esperimento.

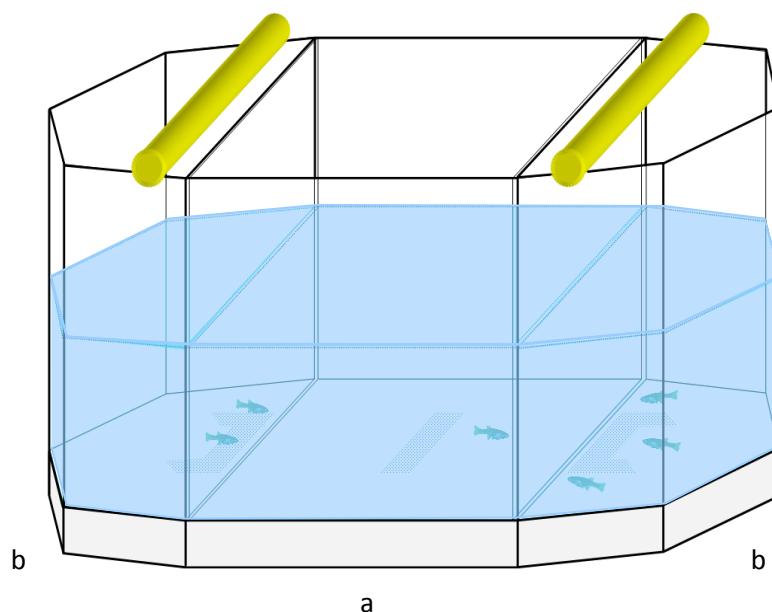


Fig. 12: Rappresentazione schematica dell'apparato sperimentale. a) area del soggetto, b) aree degli stimoli.

Pesci adulti con normale esperienza sociale

Anche per i test sui pesci adulti è stato utilizzato un apparato costituito da tre vasche adiacenti. La porzione centrale, chiamata “vasca del soggetto”, era di dimensioni 36 x 60 x 35 cm e sul fondo era applicato un rettangolo di poliplack verde (60 x 36 cm) allo scopo di migliorare la visibilità del soggetto durante l’osservazione. Alle estremità di questa vasca erano posizionate altre due vasche, chiamate “vasche degli stimoli”, di dimensioni 36 x 10 x 35 cm e il cui fondo era ricoperto da ghiaino per acquari. Ognuna delle tre vasche era illuminata con una lampada al neon da 18 W posta a 35 cm di altezza rispetto al fondo. Durante l’esperimento l’apparato veniva riempito con 10 cm di acqua mantenuta alla temperatura di 25 ± 2 °C (Fig. 13).

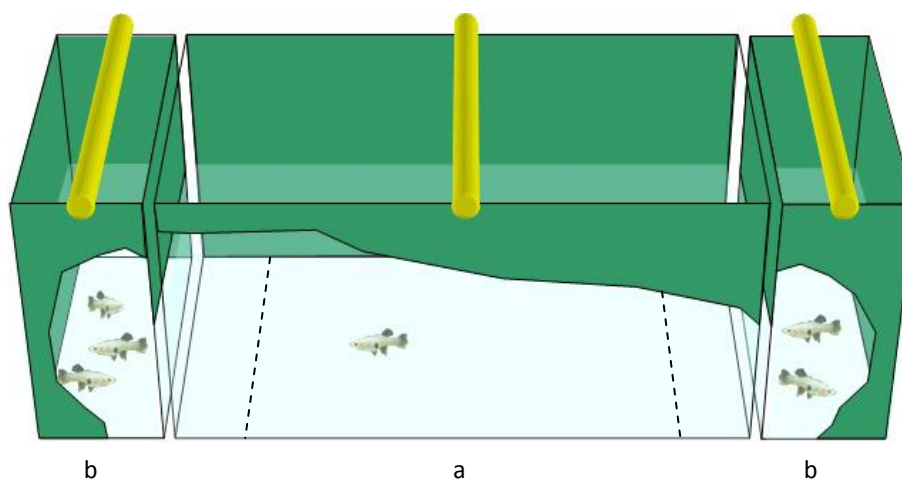


Fig. 13: *Rappresentazione schematica dell'apparato sperimentale: a) vasca del soggetto, b) vasca degli stimoli. Le linee tratteggiate indicano le aree di preferenza sociale.*

Procedura sperimentale

La stessa procedura sperimentale è stata utilizzata sia negli esperimenti condotti con i pesci giovani che in quelli condotti con i pesci adulti.

Inizialmente, i pesci stimolo venivano inseriti nelle aree degli stimoli e lasciati in ambientamento per 10 minuti. Al termine di tale periodo, un soggetto veniva prelevato dalla vasca di stoccaggio ed inserito in ambientamento al centro della vasca del soggetto all'interno di un cilindro di vetro sintetico trasparente; trascorsi 2 minuti, il cilindro veniva sollevato dall'esterno attraverso un sistema a carrucole ed il comportamento del soggetto veniva osservato per 15 minuti. Al

termine del test il soggetto veniva prelevato dall'apparato e stabulato in una vasca di stoccaggio in gruppi di circa 15 individui della stessa età. Successivamente un nuovo soggetto sperimentale veniva prelevato ed inserito nell'apparato.

Per la misura della preferenza sociale è stato preso in considerazione il tempo (misurato in secondi) trascorso dai soggetti nelle due aree limitrofe ai settori degli stimoli. Queste aree, chiamate "area di preferenza sociale", erano ciascuna della grandezza di 4 cm (11 cm nell'esperimento con pesci adulti), corrispondente a circa un quinto della dimensione dell'area del soggetto, analogamente alla porzione di spazio considerata nella ricerche precedenti (Agrillo et al., 2008). È stato poi calcolato un indice, corrispondente alla proporzione di tempo trascorsa verso il gruppo più numeroso, calcolato secondo la formula:

$$\sum \text{tempo vicino al maggiore} / (\sum \text{tempo vicino al maggiore} + \sum \text{tempo vicino al minore})$$

con "∑ tempo vicino al maggiore" e "∑ tempo vicino al minore" che indicano, rispettivamente, la sommatoria del tempo trascorso dal soggetto nell'area di preferenza sociale vicina al gruppo-stimolo di numerosità maggiore e minore. Tale indice poteva variare da un minimo di 0, che rappresentava una completa preferenza verso il gruppo di numerosità minore, ad un massimo di 1 che indicava invece una completa preferenza verso il gruppo più numeroso. Un valore di 0.5 rappresentava una scelta causale. Poiché i risultati sono espressi in percentuali, i dati sono stati opportunamente trasformati (arcoseno della radice quadrata; Sokal & Rohlf, 1995).

In ogni sessione giornaliera di prove la disposizione degli stimoli veniva invertita così da escludere l'influenza causata da eventuali artefatti legati all'apparato. In questo modo a metà dei soggetti dell'intero campione sperimentale il gruppo di conspecifici di numerosità maggiore è stato presentato sulla destra, mentre all'altra metà sulla sinistra.

Dalle analisi dei dati sono stati esclusi i soggetti che non hanno attraversato l'area del soggetto da una estremità all'altra per almeno due volte nel corso dei 15 minuti di osservazione. Questo criterio permetteva di escludere i soggetti che durante il test non avessero visitato almeno una volta entrambi i

gruppi-stimolo. Inoltre sono stati esclusi dalle analisi i soggetti che manifestavano una scarsa tendenza sociale, trascorrendo meno del 50% del tempo totale nelle due aree di preferenza sociale. I soggetti che non hanno superato i criteri prestabiliti sono stati sostituiti con altri soggetti.

Le analisi dei dati, di questo e dei successivi esperimenti, sono state effettuate utilizzando il software statistico SPSS 17.

2.1.2. Studenti universitari

Allo scopo di confrontare la capacità di discriminazione numerica dei pesci con quella degli esseri umani adulti, nel presente esperimento è stato sottoposto a test un campione di studenti universitari, ai quali sono stati presentati gli stessi confronti numerici utilizzati negli esperimenti condotti con i pesci.

Partecipanti

Hanno partecipato volontariamente all'esperimento 18 studenti universitari dell'ateneo di Padova. Gli studenti avevano un'età compresa tra i 18 e i 31 anni e un'età media di 21.33 anni. Il campione era composto da 3 maschi e 15 femmine, selezionati con vista buona o comunque corretta dall'uso di occhiali o lenti a contatto.

Stimoli e procedura

L'esperimento è stato condotto in un laboratorio del Dipartimento di Psicologia Generale dell'Università di Padova, in una stanza isolata e debolmente illuminata, al cui centro vi era un tavolo con un computer fisso.

Il soggetto veniva invitato a sedersi sulla sedia di fronte allo schermo del computer e ad appoggiare il mento su una mentoniera regolabile fissata al tavolo. Lo sperimentatore aiutava il soggetto a regolare mentoniera e sedia affinché i soggetti mantenessero tutti la stessa distanza del viso dallo schermo (60 cm) e affinché si trovassero a proprio agio nel mantenere la stessa posizione per tutta la durata dell'esperimento.

Gli stimoli erano presentati su uno schermo Philips 107 B7, di 17 pollici con risoluzione 1024 x 768 pixel. Ogni prova era formata da una coppia di stimoli presentati sequenzialmente. Ciascun stimolo era composto da pallini neri

presentati su sfondo bianco. Il numero dei pallini era compreso tra 1 e 24 ed essi avevano un diametro variabile tra i 0.31 cm e i 0.64 cm. Allo scopo di valutare possibili differenze nella prestazione dovute alla disposizione della sola informazione numerica oppure anche delle variabili continue, metà delle coppie di stimoli erano controllati per le variabili continue (area complessiva e spazio totale occupato dall'insieme di pallini), mentre l'altra metà non lo era.

Ogni presentazione cominciava con l'apparizione di un punto di fissazione nero (+) al centro dello schermo per 1000 ms, il quale veniva poi sostituito con uno stimolo. Dopo 150 ms lo stimolo scompariva lasciando la schermata bianca per 500 ms, appariva quindi un secondo stimolo per altri 150 ms. Alla scomparsa del secondo stimolo la schermata tornava bianca e il soggetto era tenuto ad indicare il più velocemente e accuratamente possibile quale tra i due stimoli fosse

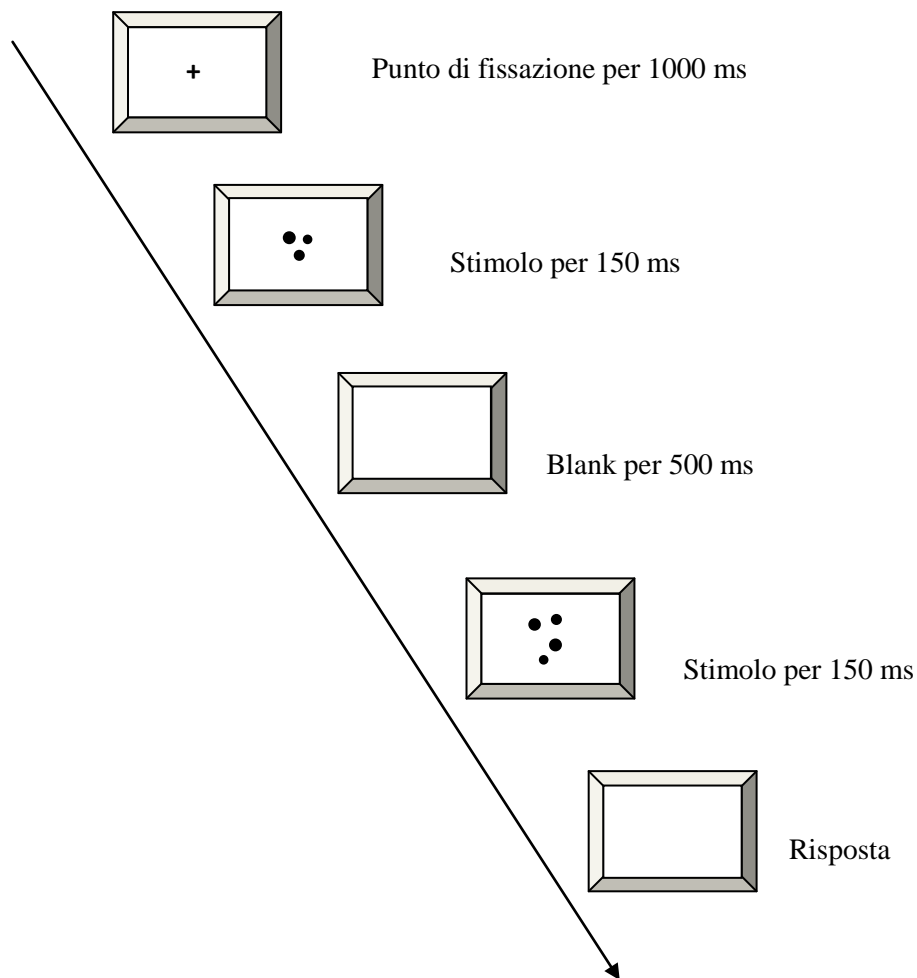


Fig. 14: Schema della procedura sperimentale. Il compito dei soggetti era di stimare quale tra i due insiemi di pallini fosse il più numeroso.

il più numeroso (Fig. 14). L'esperimento era preceduto da una fase di training allo scopo di far familiarizzare il partecipante con il compito. Tale blocco di prova era costituito da 20 coppie di stimoli con le stesse caratteristiche degli stimoli della fase test. Ad ogni risposta data dal soggetto compariva sullo schermo un feedback di accuratezza (consistente nella scritta Correct o Error). Terminata questa fase iniziava l'esperimento che prevedeva la presentazione di 240 prove suddivise in tre blocchi da 80 l'uno e aveva una durata complessiva di 20 minuti.

Allo scopo di escludere o limitare l'accesso al codice verbale, l'esperimento è stato condotto interamente in condizioni di soppressione fonocentrica. Ai partecipanti veniva chiesto di ripetere uno stimolo irrilevante, la stringa di lettere "A, B, C", in modo tale da impedire il conteggio verbale.

Sono stati registrati i tempi di risposta e l'accuratezza nei seguenti confronti numerici suddivisibili in due blocchi: 1 vs. 4, 1 vs. 3, 1 vs. 2, 2 vs. 3 e 3 vs. 4 per il range dei piccoli numeri, e 6 vs. 24, 6 vs. 18, 6 vs. 12, 6 vs. 9 e 6 vs. 8 per il range dei grandi numeri. Quindi per entrambi i range nei confronti proposti i valori del rapporto erano nell'ordine: 0.25, 0.33, 0.50, 0.67 e 0.75, così come nell'esperimento condotto con i pesci.

Nelle analisi statistiche è stato utilizzato un indice d'accuratezza, ovvero la proporzione di risposte corrette sulle risposte totali. Tale misura poteva variare da un minimo di 0, quando tutte le risposte erano sbagliate, ad un massimo di 1 quando tutte le risposte erano corrette.

Per quanto riguarda i tempi di risposta dalle analisi sono stati esclusi i casi con tempi di risposta maggiori a 2000 ms. Sono state così omesse 43 risposte sulle 4800 totali.

Pesci: Risultati

I dati riguardanti il range dei piccoli numeri e quelli riguardanti i grandi numeri sono stati analizzati separatamente, utilizzando un'ANOVA 2 x 5 in cui i fattori tra i soggetti erano l'"esperienza" (giovani senza esperienza di gruppo / adulti con normale esperienza sociale) e il rapporto numerico (0.25/ 0.33/ 0.50/ 0.67/ 0.75). La variabile dipendente considerata era la proporzione di tempo trascorsa verso il gruppo più numeroso.

Piccoli numeri: La proporzione di tempo trascorsa verso il gruppo più numeroso non è influenzata né dal rapporto numerico che intercorre tra i due gruppi messi a confronto ($F_{(4,169)} = 0.047$, $p = 0.996$) né dall'esperienza ($F_{(1,169)} = 0.030$, $p = 0.864$); anche l'interazione tra i due fattori non è risultata statisticamente significativa ($F_{(4,169)} = 0.242$, $p = 0.914$) (Fig. 15). Il trend non è risultato statisticamente significativo ($F_{(4, 169)} = 0.045$, $p = 0.876$). Anche l'analisi della verosimiglianza (per i dettagli vedi Glover e Dixon, 2004) riflette l'assenza di un effetto del rapporto numerico ($\lambda = 3.68$).

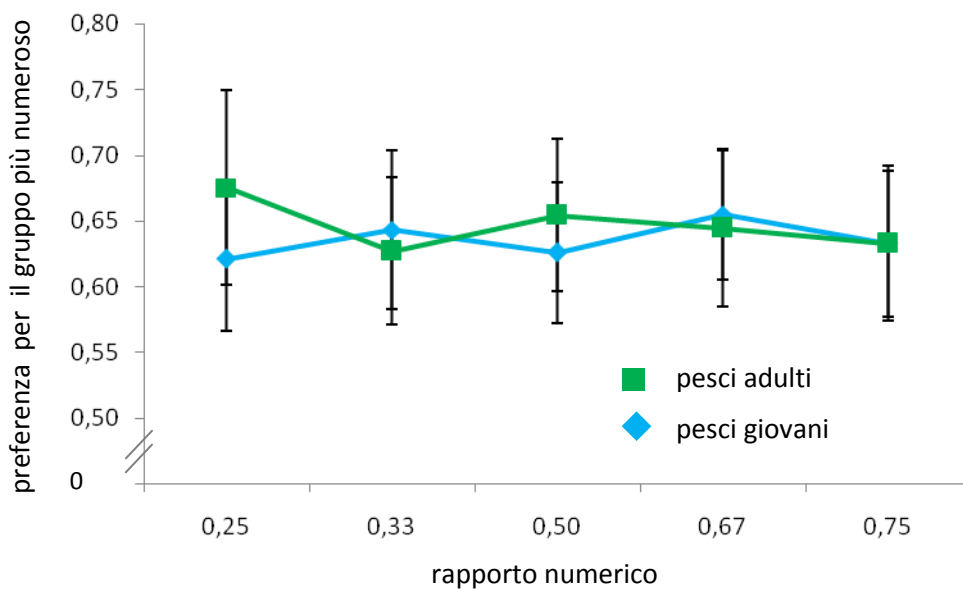


Fig. 15: La prestazione dei pesci, sia con esperienza che senza esperienza sociale, non è influenzata dal rapporto numerico nel range dei piccoli numeri.

Grandi numeri: Nei grandi numeri, al contrario, il rapporto influenza significativamente il comportamento dei soggetti ($F_{(4,169)} = 3.190$, $p = 0.015$) mentre il fattore esperienza non è risultato statisticamente significativo ($F_{(1,169)} = 0.300$, $p = 0.585$; interazione: $F_{(4,169)} = 0.341$, $p = 0.850$) (Fig. 16). È inoltre emerso un trend lineare significativo ($F_{(4, 169)} = 3.312$, $p < 0.001$).

All'interno del range dei piccolo numeri, è stata osservata una preferenza statisticamente significativa per il gruppo più numeroso per tutti i rapporti numerici (test t a campione unico: 0.25: $t(33) = 3.265$, $p = 0.003$; 0.33: $t(33) =$

3.260, $p = 0.003$; 0.50: $t(33) = 3.537$, $p < 0.001$; 0.67: $t(33) = 4.003$, $p < 0.001$; 0.75: $t(33) = 3.230$, $p = 0.003$). Per quanto riguarda invece il range dei grandi numeri, i pesci hanno trascorso più tempo verso il gruppo più numeroso quando i confronti numerici avevano un rapporto di 0.25 ($t(33) = 6.922$, $p < 0.001$), 0.33 ($t(33) = 5.788$, $p < 0.001$) e 0.50 ($t(33) = 4.466$, $p < 0.001$), ma non quando il rapporto era 0.67 ($t(33) = 1.481$, $p = 0.148$) e 0.75 ($t(33) = 1.159$, $p = 0.255$).

Nessun rapporto numerico differisce in maniera statisticamente significativa tra i due range numerici (tutti $p > 0.050$). Tuttavia, l'analisi condotta sul campione aumentato mostra una differenza statisticamente significativa tra 2 vs. 3 e 4 vs. 6 (entrambi con rapporto numerico di 0.67) (test t a campioni indipendenti: $t(130) = 2.688$, $p = 0.008$).

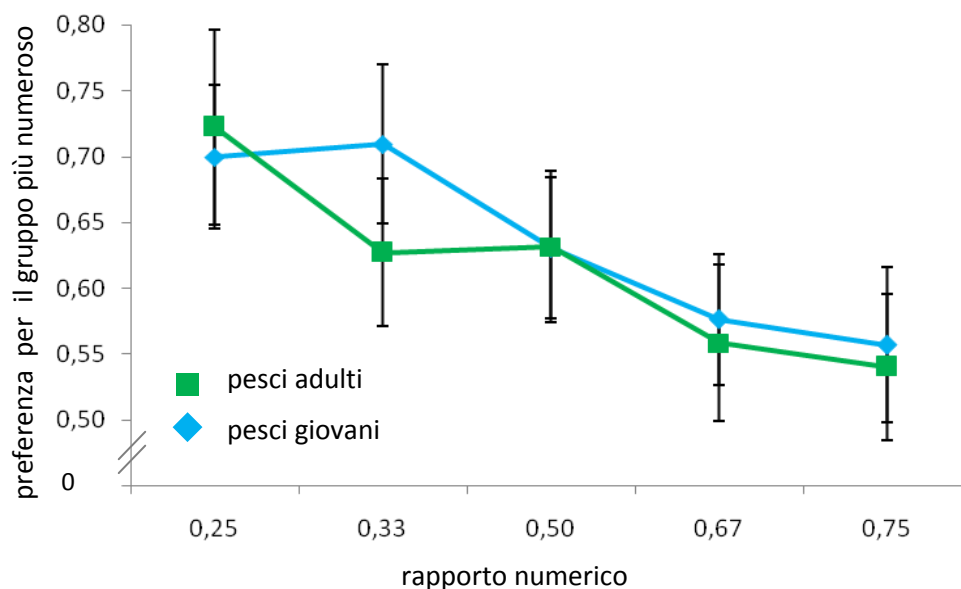


Fig. 16: La prestazione dei pesci, sia con esperienza che senza esperienza sociale, è influenzata dal rapporto numerico nel range dei grandi numeri.

Studenti universitari: Risultati

I dati riguardanti il range dei piccoli numeri e quelli riguardanti i grandi numeri sono stati analizzati separatamente attraverso un'ANOVA 2 (variabili continue: controllate/ non controllate) x 5 (rapporto numerico: 0.25/ 0.33/ 0.50/ 0.67/ 0.75). La stessa analisi è stata condotta sia sui tempi di risposta che sull'accuratezza.

Piccoli numeri: I tempi di risposta non sono influenzati né dal rapporto numerico ($F_{(4,68)} = 1.474$, $p = 0.220$) né dalle variabili continue ($F_{(1,17)} = 0.421$, $p = 0.525$). L'interazione tra i due fattori non è risultata statisticamente significativa ($F_{(4,68)} = 0.822$, $p = 0.516$). Allo scopo di valutare se vi fosse un trend significativo, è stata condotta un'analisi polinomiale del trend (Keppel, 1991), ma non è stato trovato nessun trend lineare o di ordine superiore ($F_{(1,17)} = 2.644$, $p = 0.122$). Inoltre anche un'analisi della verosimiglianza riflette l'assenza di un effetto significativo del rapporto numerico ($\lambda = 3.67$).

Un pattern di risultati simile è stato trovato anche nelle analisi condotte sull'accuratezza. La prestazione dei partecipanti infatti non è influenzata né dal rapporto numerico ($F_{(4,68)} = 0.572$, $p = 0.684$), né dalle variabili continue ($F_{(1,17)} = 1.285$, $p = 0.273$). L'interazione tra i due fattori non è statisticamente significativa ($F_{(4,68)} = 0.383$, $p = 0.820$). Non è emerso nessun trend significativo ($F_{(1,17)} = 0.378$, $p = 0.547$), e l'analisi della verosimiglianza supporta l'assenza di un effetto del rapporto numerico ($\lambda = 1.15$) (Fig. 17).

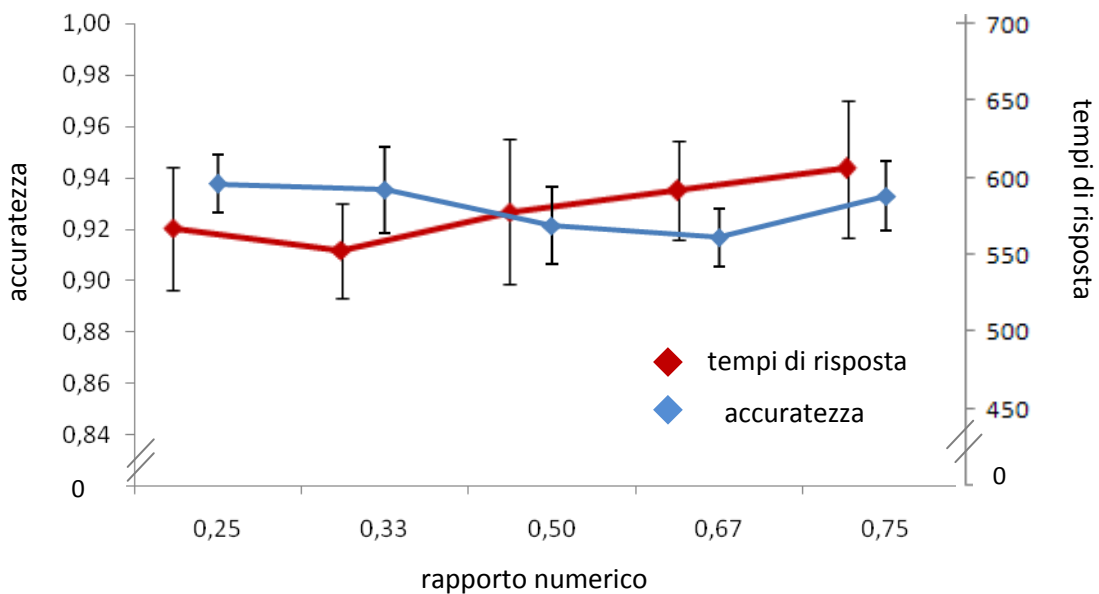


Fig. 17: Sia l'accuratezza che i tempi di risposta non sono influenzati dal rapporto numerico nel range dei piccoli numeri

Grandi numeri: Nel range dei grandi numeri i tempi di risposta sono influenzati dal rapporto numerico, infatti si allungano all'aumentare del rapporto ($F_{(4,68)} = 31.889$, $p < 0.001$). Le variabili continue e l'interazione tra i due fattori non

risultano statisticamente significativi (rispettivamente: $F_{(1,17)} = 2.880$, $p = 0.108$; $F_{(4,68)} = 2.469$, $p = 0.053$). Inoltre le analisi mostrano un trend significativo (trend lineare: $F_{(1,17)} = 57.302$, $p < 0.001$; trend quadratico: $F_{(1,17)} = 8.250$, $p = 0.011$).

Il quadro di risultati che si ottiene analizzando l'accuratezza è molto simile, infatti i partecipanti commettono più errori all'aumentare del rapporto numerico ($F_{(4,68)} = 8.564$, $p < 0.001$), mentre le variabili continue non influenzano la prestazione ($F_{(1,17)} = 0.205$, $p = 0.657$). L'interazione tra i due fattori non è statisticamente significativa ($F_{(4,68)} = 0.359$, $p = 0.837$) (Fig. 18). Il trend risulta significativo (trend lineare: $F_{(1,17)} = 24.348$, $p < 0.001$; trend quadratico: $F_{(1,17)} = 8.303$, $p = 0.010$).

Nel complesso l'accuratezza dei partecipanti nei confronti appartenenti al range dei piccoli numeri non differisce da quella nei confronti fra grandi numeri ($t(17) = 1.877$, $p = 0.078$). Tuttavia nei confronti con un rapporto di 0.75 l'accuratezza è significativamente migliore nel range dei piccoli numeri rispetto a quella nel range dei grandi numeri ($t(17) = 2.197$, $p = 0.042$).

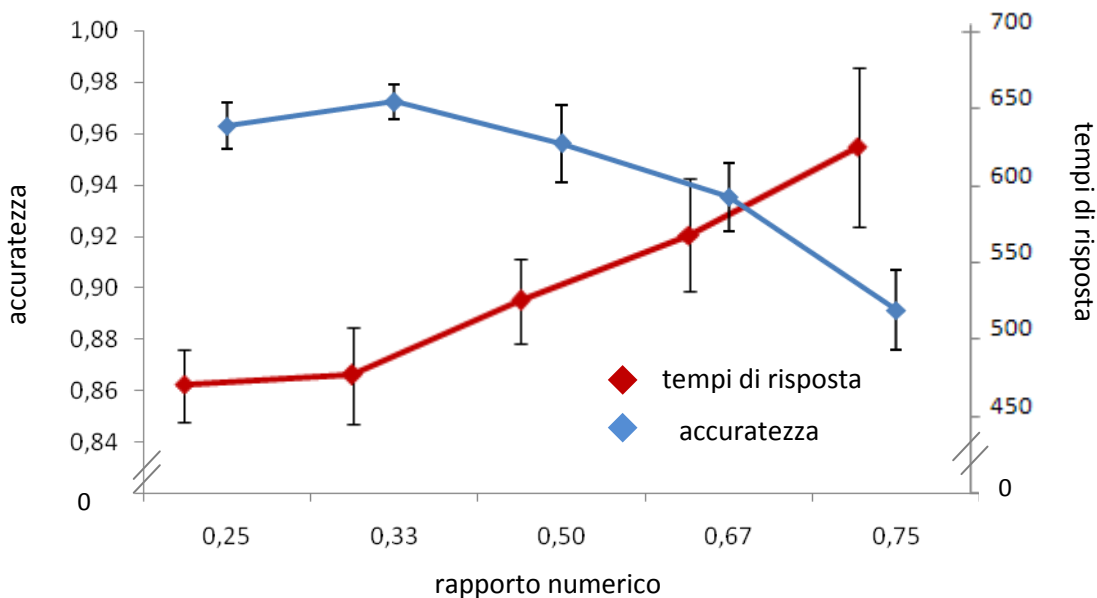


Fig. 18: Sia l'accuratezza che i tempi di risposta sono influenzati dal rapporto numerico nel range dei grandi numeri.

2.2 Esperimento 2: La discriminazione tra piccoli e grandi numeri

In letteratura un'importante prova a sostegno dell'esistenza di sistemi numerici indipendenti per piccole e grandi quantità proviene dagli studi condotti sui bambini che dimostrano la loro incapacità di risolvere dei compiti di discriminazione numerica quando le quantità messe a confronto appartengono ai due diversi range (Feigenson et al., 2002; Feigenson & Carey, 2005; Xu, 2003). È stato quindi condotto un esperimento su esemplari adulti di *Poecilia reticulata* in cui, utilizzando la procedura di scelta spontanea, è stata confrontata la prestazione in compiti di discriminazione fra quantità che potevano appartenere allo stesso range (piccoli vs. piccoli, grandi vs. grandi) o ai due diversi range (piccoli vs. grandi).

Soggetti

Sono state utilizzate come soggetti sperimentali 126 femmine adulte di *Poecilia reticulata*, 18 per ciascun confronto numerico, nate ed allevate presso il Laboratorio di Psicologia Comparata dell'Università degli Studi di Padova, dove sono state condotte tutte le osservazioni. Le condizioni di stabulazione erano identiche a quelle descritte nell'esperimento 1. Ciascun soggetto è stato osservato solamente una volta nel corso della ricerca, le femmine utilizzate come stimoli, invece, provenivano da un pool di circa 60 individui e pertanto potevano essere utilizzate più volte nel corso degli esperimenti.

Apparato e procedura sperimentale

È stato utilizzato lo stesso apparato a tre vasche descritto nell'esperimento 1 ed è stata mantenuta la stessa procedura sperimentale. Il soggetto veniva inserito nella vasca centrale e dopo 2 minuti di ambientamento veniva lasciato libero di nuotare nella vasca e il suo comportamento veniva registrato per 15 minuti. I soggetti sono stati suddivisi in 6 gruppi, a ciascuno dei quali è stato presentato un diverso confronto numerico. In quattro condizioni il confronto era fra una numerosità appartenente al range dei piccoli numeri e una appartenente a quello dei grandi (3 vs. 5; 3 vs. 6; 3 vs. 7; 3 vs. 9), in una condizione era tra due piccoli numeri (3 vs. 4) ed infine in una era tra due grandi numeri (5 vs. 10).

I soggetti che non attraversavano la vasca del soggetto da una estremità all'altra almeno due volte nel corso dei 15 minuti di osservazione o che trascorrevano meno del 50% del tempo totale nelle due aree di preferenza sono stati esclusi dalle analisi e sostituiti con altri individui.

L'indice di preferenza sociale è stata calcolata secondo la formula descritta in precedenza e i dati sono stati trasformati per l'arcoseno della radice quadrata (Sokal & Rohlf, 1995).

Risultati

I pesci hanno trascorso significativamente più tempo vicino al gruppo più numeroso quando il confronto era all'interno del range delle piccole numerosità (test t a campione unico: 3 vs. 4: $t(17) = 3.581$, $p = 0.003$), e quando era nel range dei grandi numeri (5 vs. 10: $t(17) = 2.695$, $p = 0.015$). Nel caso in cui invece il confronto era tra una piccola e una grande numerosità non è stata osservata una scelta significativa nel confronto 3 vs. 5 ($t(17) = 0.715$, $p = 0.484$), mentre i pesci hanno mostrato una preferenza per il gruppo più numeroso all'aumentare della differenza tra i due gruppi (3 vs. 6: $t(17) = 3.033$, $p = 0.008$, 3 vs. 7: $t(17) = 2.333$, $p = 0.032$ e 3 vs. 9: $t(17) = 2.186$, $p = 0.043$) (Fig. 19).

In seguito è stata condotta un'ANOVA univariata sui quattro confronti in cui le numerosità appartenevano ai due diversi range (3 vs. 5, 3 vs. 6, 3 vs. 7 e 3 vs. 9). I risultati mostrano che non vi è un effetto del rapporto numerico ($F_{(3,71)} = 0.541$, $p = 0.656$).

Al fine di verificare se il confronto numerico 3 vs. 5 sia effettivamente impossibile da risolvere per i pesci o sia semplicemente più difficile, è stato sottoposto a test un secondo gruppo di soggetti in questo confronto numerico. Anche in questo caso non è emersa nessuna preferenza significativa per uno dei due gruppi di conspecifici (media \pm ds: 0.472 ± 0.195 , $t(17) = 0.600$, $p = 0.557$). La differenza tra il primo e il secondo campione osservati nel confronto 3 vs. 5 non è statisticamente significativa ($t(34) = 0.823$, $p = 0.416$).

Inoltre allo scopo di verificare se vi fosse una differenza tra le tre condizioni, i diversi tipi di confronto sono stati paragonati tra loro. In particolare è stata condotta un'ANOVA 2 x 2 sui confronti 3 vs. 4 e 3 vs. 5 in cui il fattore

entro i soggetti era la numerosità del gruppo (gruppo più numeroso/ meno numeroso) e il fattore tra i soggetti era il tipo di confronto (piccolo vs. piccolo/ piccolo vs. grande). Dall'analisi è emerso un effetto significativo del fattore numerosità ($F_{(1,52)} = 4.878$, $p = 0.032$) e un'interazione significativa tra i due fattori ($F_{(1,52)} = 5.434$, $p = 0.024$), mentre il fattore tipo di confronto non è statisticamente significativo ($F_{(1,52)} = 1.190$, $p = 0.280$). La stessa analisi è stata condotta sui confronti 3 vs. 5 e 5 vs. 10, ed è emerso lo stesso pattern di risultati: il fattore numerosità e l'interazione tra i due fattori sono statisticamente significativi (rispettivamente: $F_{(1,52)} = 5.681$, $p = 0.021$ e $F_{(1,52)} = 4.967$, $p = 0.030$), mentre il tipo di confronto non è significativo ($F_{(1,52)} = 0.005$, $p = 0.945$).

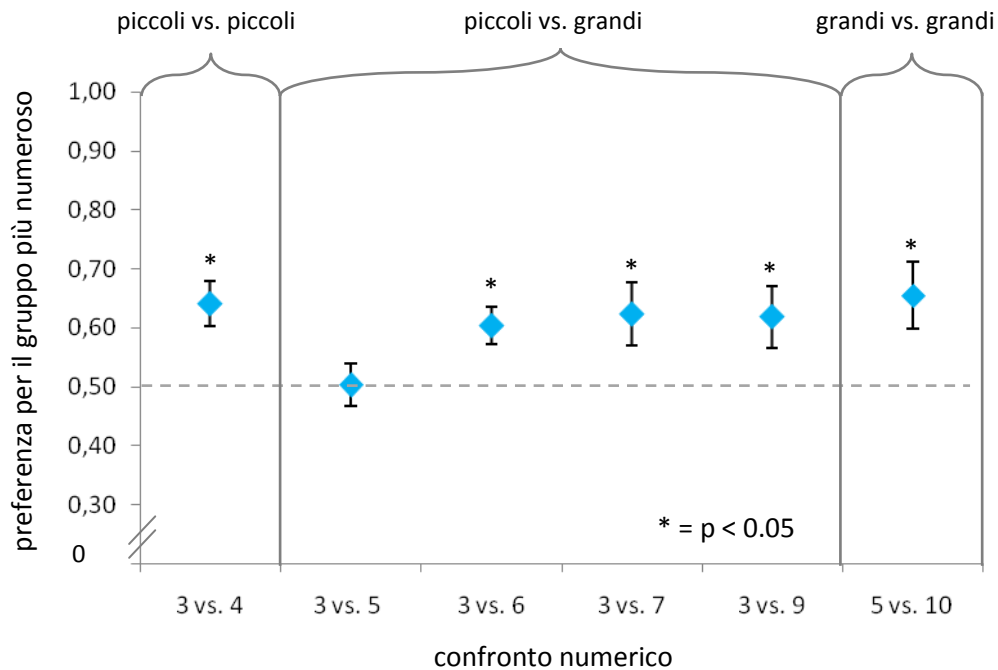


Fig. 19: I pesci trascorrono più tempo verso il gruppo più numeroso nei confronti 3 vs. 4 (piccoli vs. piccoli) e 5 vs. 10 (grandi vs. grandi), mentre non mostrano nessuna preferenza in 3 vs. 5 (piccoli vs. grandi). Tuttavia all'aumentare della distanza numerica la preferenza diventa significativa anche nei confronti piccoli vs. grandi.

2.3 Discussione

Il primo esperimento ha documentato che il pattern di risultati che si ottiene in un compito di discriminazione nei pesci è molto simile a quello che si ottiene in studenti universitari che eseguono lo stesso compito. In entrambe le specie l'abilità di discriminare fra grandi quantità (>4) è fortemente influenzata dal rapporto numerico che intercorre tra le numerosità. Al contrario, la capacità di discriminare quantità all'interno del range dei piccoli numeri non dipende dal rapporto numerico: discriminare 1 da 4 è facile quanto discriminare 3 da 4.

Nei pesci, una possibile spiegazione alla differenza evidenziata nei due range numerici è che questa sia la conseguenza di una diversa frequenza di esperienze con gruppi di piccole e grandi dimensioni e che quindi sia dovuta ad un diverso grado di familiarità con le piccole e le grandi quantità. Tuttavia il fatto che anche pesci allevati in coppia, e quindi privati della possibilità di fare esperienza di gruppi di diversa numerosità, mostrino lo stesso pattern di risultati tende ad escludere quest'ipotesi e suggerisce che nei pesci alcune abilità numeriche siano innate.

Per quanto riguarda il confronto con la specie umana, le procedure sperimentali utilizzate potrebbero sembrare molto diverse, poiché nel caso dei pesci i gruppi stimolo vengono presentati simultaneamente, mentre nel caso dell'uomo sono presentati sequenzialmente. In realtà, l'apparato sperimentale utilizzato con i pesci impedisce di vedere binocularmente e simultaneamente i due gruppi. Infatti, poiché i pesci hanno gli occhi posti lateralmente, i due gruppi sono visibili in contemporanea solo quando il soggetto nuota perpendicolarmente all'asse principale dell'apparato, e questo accade raramente. Inoltre anche in questa posizione il pesce non può vedere i due gruppi con lo stesso occhio.

La diversa dipendenza dal rapporto numerico suggerisce sia nei pesci che nell'uomo l'esistenza di due distinti sistemi numerici, uno per la rappresentazione delle quantità comprese tra 1 e 4 e uno per le quantità maggiori. Tuttavia l'esistenza di un sistema preciso per l'elaborazione dei piccoli numeri implicherebbe anche una maggiore accuratezza della prestazione entro questo range, mentre i dati qui presentati non avvalorano questa previsione. Il fatto che negli esperimenti condotti sui pesci l'accuratezza complessiva non differisca tra i

due range numerici potrebbe essere dovuto ad un limite intrinseco alla procedura sperimentale stessa. Infatti studi precedenti condotti con la stessa procedura hanno mostrato che l'accuratezza con cui i pesci scelgono il gruppo più numeroso non supera mai il 70%, anche in confronti numerici molto semplici (Agrillo et al., 2008; Agrillo & Dadda, 2007; Gómez-Laplaza & Gelerai, 2011a). Inoltre la mancanza di differenza potrebbe essere dovuta alla combinazione di una forte variabilità dei dati con un campione sperimentale non molto ampio. A conferma di quest'interpretazione, per quanto riguarda il rapporto numerico 0.67 per il quale il campione è stato triplicato è emersa una differenza significativa tra il confronto fra piccoli numeri (2 vs. 3) e quello fra grandi numeri (4 vs. 6).

È necessario però sottolineare che alcuni studi recenti, condotti su diverse specie, hanno dimostrato che la prestazione dei soggetti è influenzata dal rapporto numerico non solo all'interno del range dei grandi numeri ma anche all'interno di quello dei piccoli numeri, mettendo quindi in discussione l'ipotesi dell'esistenza di due sistemi numerici differenti (Beran, 2007; Cantlon & Brannon, 2006). Ad oggi ancora non è chiaro il motivo di tale discrepanza nei risultati riportati in letteratura. Una possibile spiegazione si rifà alla possibilità che i piccoli numeri siano rappresentabili sia dal sistema dell'object-file che da quello dell'analog magnitude, e che l'utilizzo di un sistema piuttosto che dell'altro dipenda dal contesto in cui avviene il compito e dall'esperienza pregressa (vanMarle & Wynn, 2009; Cordes & Brannon, 2008b). In linea con quest'ipotesi un recente studio condotto su soggetti umani adulti ha trovato che in un gruppo di partecipanti esperti in un'attività che richiede la stima di grandezze la loro prestazione in compiti di discriminazione numerica è influenzata dal rapporto numerico anche nel range dei piccoli numeri, a differenza di quanto avviene nel gruppo di controllo (Agrillo & Piffer, sottomesso).

In letteratura un dato ritenuto un'importante prova a sostegno dell'esistenza di sistemi numerici indipendenti per piccole e grandi quantità proviene dagli studi condotti sui bambini che dimostrano la loro incapacità di risolvere dei compiti di discriminazione numerica quando le quantità messe a confronto appartengono ai due diversi range (Feigenson et al., 2002; Feigenson & Carey, 2005; Xu, 2003). Per questo nell'esperimento successivo è stata

confrontata la prestazione di pesci adulti in compiti di discriminazione fra quantità che potevano appartenere allo stesso range (piccoli vs. piccoli, grandi vs. grandi) o ai due diversi range (piccoli vs. grandi). I risultati dimostrano che i soggetti discriminano tra i due gruppi quando entrambe le numerosità confrontate appartengono allo stesso range (3 vs. 4 e 5 vs. 10), mentre falliscono nel confronto 3 vs. 5. Ciò significa che i pesci sono in grado di discriminare tra piccole quantità più precisamente di quanto non lo siano tra piccole e grandi quantità. Questo dato suggerisce che il confronto 3 vs. 4 non sia elaborato dal sistema dell'analog magnitude, che è caratterizzato da una forte dipendenza dal rapporto numerico tra le quantità confrontate, ma piuttosto da un meccanismo per le piccole numerosità insensibile al rapporto numerico. È anche emerso però che i soggetti sono in grado di discriminare confronti in cui le due quantità appartengono ai due diversi range, quando la differenza tra le due aumenta (3 vs. 6, 3 vs. 7 e 3 vs. 9). Un recente studio condotto su bambini di 7 mesi ha evidenziato risultati simili (Cordes & Brannon, 2009). Attraverso una procedura di abituação e diasabituazione, le autrici hanno dimostrato che i bambini sono in grado di discriminare due quantità appartenenti ai due differenti range quando il loro rapporto è di 0.25 ma non sono in grado quando il rapporto è di 0.50. Sono state avanzate due ipotesi per poter interpretare questi dati. La prima, chiamata "ipotesi del rumore", sostiene che in questo tipo di confronto i bambini potrebbero inizialmente rappresentarsi i piccoli numeri attraverso il sistema object-file e i grandi numeri attraverso l'analog magnitude; in seguito convertirebbero la rappresentazione dei piccoli numeri nel formato dell'analog magnitude, in modo tale da poter confrontare le due quantità. Secondo quest'ipotesi, la necessità di un rapporto numerico più favorevole per permettere la discriminazione tra quantità appartenenti ai diversi range sarebbe dovuta ad un aumento della variabilità nella rappresentazione delle piccole quantità, conseguente alla conversione dal formato object-file. Una seconda ipotesi invece viene chiamata "ipotesi della soglia" e prevede che sia i grandi numeri che i piccoli siano rappresentati attraverso il sistema dell'analog magnitude. Quando la differenza tra le due quantità è troppo piccola e non supera una determinata soglia, si attiva il sistema object-file che permette una rappresentazione più accurata e precisa. Quando invece il rapporto supera una

soglia, che è di 0.25 nei bambini, la rappresentazione dell'object-file viene ignorata e il confronto fra una piccola e una grande quantità avviene unicamente tramite le rappresentazioni dell'analog magnitude. I dati qui presentati non collimano perfettamente con nessuna delle due ipotesi. Entrambe le ipotesi originate dai dati sui bambini predicono una peggiore precisione nei confronti tra quantità appartenenti ai due diversi range rispetto a confronti tra quantità dello stesso range. Nei pesci questo non avviene: il rapporto numerico necessario affinché essi siano in grado di discriminare una piccola da una grande quantità non è minore di quello necessario per confronti in cui entrambe le quantità appartengono al range dei grandi numeri (Agrillo et al. 2008, Buckingham et al. 2007). Inoltre analizzando i dati dei confronti tra piccole e grandi quantità non è stato trovato un effetto del rapporto numerico. Presumibilmente questi confronti avvengono tramite l'attivazione dell'analog magnitude, anche se la mancanza di un effetto del rapporto numerico potrebbe suggerire che tutti questi confronti siano ugualmente facili.

Nel loro insieme i risultati riportati in questi primi esperimenti sembrano suggerire l'esistenza nei pesci di due sistemi indipendenti per l'elaborazione dei piccoli e dei grandi numeri, il primo insensibile al rapporto numerico, e il secondo fortemente dipendente dal rapporto. Inoltre la somiglianza tra il pattern di risultati ottenuti con i pesci e i risultati degli studenti universitari suggerisce che i meccanismi sottostanti alla cognizione numerica potrebbero essere simili nelle due specie.

3. L'ontogenesi delle abilità numeriche

Ad oggi i dati sull'ontogenesi delle abilità numeriche sono limitati alla specie umana, mentre ancora non è stato chiarito se negli animali queste capacità siano innate o se emergano con lo sviluppo. Lo studio dell'ontogenesi di queste abilità può rappresentare anche un ulteriore modo per indagare i sistemi alla base della cognizione numerica. Infatti se esistono due sistemi indipendenti è possibile che essi compaiano in momenti diversi o abbiano traiettorie di sviluppo distinte, come osservato nella specie umana (Cordes & Brannon, 2008b). In questo ambito *Poecilia reticulata* rappresenta un ottimo modello sperimentale in quanto gli avannotti di questa specie sono già indipendenti alla nascita.

3.1 Esperimento 3: Le abilità numeriche alla nascita

Precedenti ricerche hanno documentato come esemplari adulti di *Poecilia reticulata* siano in grado di discriminare quale tra due gruppi di conspecifici sia il più numeroso. In questo esperimento ci si è chiesti se tale capacità sia presente fin dalla nascita, e per questo sono stati sottoposti a test avannotti di 24 ore di vita privi di precedenti esperienze sociali.

In letteratura numerosi studi hanno suggerito che nell'uomo vi siano due meccanismi distinti per l'elaborazione di piccole e grandi quantità (Feigenson & Carey, 2005; Xu, 2003; Xu & Spelke, 2000), e gli esperimenti precedenti sembrano suggerire che questo sia valido anche per i pesci. In questo esperimento sono stati quindi utilizzati due diversi confronti numerici, uno appartenente al range delle piccole numerosità e uno appartenente a quello delle grandi (rispettivamente 2 vs. 3 e 4 vs. 8). Come dimostrato nell'esperimento 1 in entrambi i confronti gli esemplari adulti di *Poecilia reticulata* sono in grado di discriminare facilmente quale sia la numerosità maggiore. Lo scopo era di verificare se quest'abilità sia già presente alla nascita o emerga invece con lo sviluppo. Inoltre dalla letteratura è noto che nei bambini la capacità di distinguere grandi numerosità si osserva nei primi giorni di vita solo se il rapporto numerico tra le quantità è molto semplice (Izard et al., 2009). Con lo sviluppo si assiste ad

un miglioramento delle capacità numeriche e della precisione di discriminazione (Xu & Spelke, 2000). Allo scopo di verificare se anche in *Poecilia reticulata* la capacità di distinguere tra grandi numerosità sia presente sin dalla nascita, pur meno precisa rispetto a quella dei giovani e degli adulti, è stato eseguito un ulteriore test, aggiungendo un terzo confronto numerico (4 vs. 12), appartenente al range dei grandi numeri ma caratterizzato da un rapporto numerico più semplice rispetto al precedente (0.33).

Infine sono stati presentati due confronti numerici in cui un gruppo apparteneva al range dei piccoli numeri e l'altro al range dei grandi numeri (2 vs. 5 e 3 vs. 8)

Soggetti

Sono stati utilizzati come soggetti sperimentali un totale di 100 individui di *Poecilia reticulata*, 20 per ogni confronto numerico. I soggetti, nati e allevati presso il laboratorio di Psicologia Animale e Comparata, presso l'Università degli Studi di Padova, sono stati testati a 24 ore di vita. I soggetti non sono stati sottoposti a test subito dopo la nascita perché appena nati alcuni piccoli presentano ancora il sacco vitellino e hanno difficoltà di nuoto. Per tale motivo il test è stato eseguito a 24 ore di età; per evitare che durante questo periodo potessero avere esperienza sociale, ciascuno di essi veniva prelevato dalla nursery appena nato ed inserito individualmente in vasche di 12 x 12 x 12 cm di stabulazione sino al momento del test. Gli stimoli utilizzati durante il test avevano la stessa età, dimensione e condizioni di stabulazione dei soggetti. Ciascun soggetto sperimentale è stato sottoposto al test una sola volta. Al contrario gli stimoli sono stati utilizzati più volte nel corso degli esperimenti.

Apparato e procedura sperimentale

L'apparato e la procedura sperimentale sono gli stessi di quelli utilizzati nell'esperimento 1 con pesci a 24 ore di vita. In ogni sessione giornaliera di prove la disposizione degli stimoli veniva invertita così da escludere l'influenza causata da eventuali artefatti legati all'apparato. Anche in questo caso sono stati esclusi dalle statistiche e sostituiti con altri individui i soggetti che non hanno attraversato

l'area del soggetto da una estremità all'altra per almeno due volte nel corso dei 15 minuti di osservazione e quelli che non hanno trascorso almeno il 50% del tempo nelle aree di scelta. La misura di preferenza sociale è stata calcolata secondo la formula descritta in precedenza e i dati sono stati trasformati per l'arcoseno della radice quadrata (Sokal & Rohlf, 1995).

La preferenza verso uno dei due gruppi in ciascun confronto numerico è stata valutata tramite un test t-Student a campione unico.

Risultati

La posizione degli stimoli non ha influenzato la preferenza dei soggetti né nel confronto 2 vs. 3 (test t a campioni indipendenti, $t(18) = 0.034$, $p = 0.973$), né in 4 vs. 8 ($t(18) = 0.071$, $p = 0.944$), né in 4 vs. 12 ($t(18) = 21.423$, $p = 0.172$).

Dalle analisi è emersa una preferenza per il gruppo più numeroso statisticamente significativa unicamente quando il confronto numerico era 2 vs. 3 (test t a campione unico: $t(19) = 4.503$, $p = 0.001$); mentre non è stata osservata nessuna preferenza nei confronti 4 vs. 8 ($t(19) = 0.012$, $p = 0.990$) e 4 vs. 12 ($t(19) = 0.133$, $p = 0.895$) (Fig. 20).

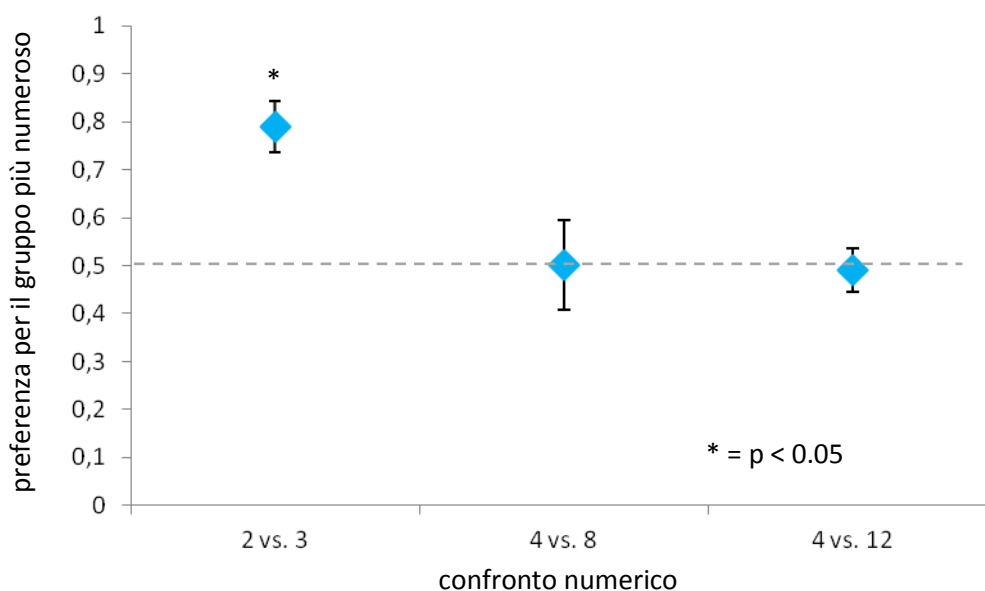


Fig. 20: I pesci a 24 ore di vita trascorrono più tempo verso il gruppo più numeroso solo nel confronto 2 vs. 3

Un'ANOVA univariata sulla proporzione di tempo trascorso verso il gruppo più numeroso ha mostrato una differenza statisticamente significativa tra i

tre confronti numerici ($F_{(2,59)}=5.917$, $p = 0.005$). L'analisi post-hoc di Bonferroni ha evidenziato una differenza tra il confronto 2 vs. 3 e gli altri confronti numerici (4 vs. 8: $p = 0.014$; 4 vs. 12: $p = 0.012$), mentre non è stata rilevata nessuna differenza tra questi ultimi due ($p = 1$).

Per quanto riguarda i confronti tra piccoli e grandi numeri, i soggetti hanno mostrato una preferenza significativa per il gruppo più numeroso in entrambi i test (2 vs. 5: $\text{media} \pm \text{ds} = 0.642 \pm 0.056$, $t(19) = 2.616$, $p = 0.017$; 3 vs. 8: 0.670 ± 0.210 , $t(19) = 3.425$, $p = 0.003$).

3.2 Esperimento 4: Il limite del sistema dei piccoli numeri

Il precedente esperimento ha documentato come esemplari di *Poecilia reticulata* a 24 ore di vita siano in grado di selezionare quale insieme sia il più numeroso quando vengono messe a confronto piccole numerosità (2 vs. 3), ma non quando sono messe a confronto numerosità maggiori (4 vs. 8 o 4 vs. 12). Questo risultato suggerisce come nei pesci la capacità di discriminare piccole quantità sia innata, mentre quella di discriminare grandi quantità emerga più tardi con lo sviluppo. Tuttavia nel precedente esperimento è stato indagato un unico confronto numerico appartenente al range delle piccole quantità: in questo studio sono quindi stati presentati altri confronti numerici (1 vs. 2, 2 vs. 3, 3 vs. 4, 4 vs. 5, e 5 vs. 6) allo scopo di individuare quale sia per gli avannotti il limite preciso nella capacità di discriminare numerosità che differiscono di una sola unità.

Soggetti

Sono stati utilizzati come soggetti sperimentali un totale di 100 individui di *Poecilia reticulata*, 20 per ogni confronto numerico. Le condizioni di mantenimento dei soggetti erano identiche a quelle riportate per il precedente esperimento.

Apparato e procedura sperimentale

L'apparato e la procedura sperimentale sono gli stessi di quelli utilizzati nell'esperimento 1. La misura di preferenza sociale è stata calcolata secondo la formula descritta in precedenza.

Risultati

La posizione del gruppo più numeroso, a destra o a sinistra rispetto al settore centrale, non ha influenzato le risposte dei soggetti osservati in questo esperimento (t a campioni indipendenti: $t(98) = 1.059$, $p = 0.292$).

I soggetti hanno trascorso più tempo verso il gruppo più numeroso quando il confronto numerico era 1 vs. 2 (t a campione unico: $t(19) = 2.424$, $p = 0.026$), 2 vs. 3 ($t(19) = 3.074$, $p = 0.006$), 3 vs. 4 ($t(19) = 2.356$, $p = 0.029$). Non si

evidenza invece alcuna preferenza significativa nei confronti numerici 4 vs. 5 ($t(19) = -0.984$, $p = 0.338$) e 5 vs. 6 ($t(19) = -0.155$, $p = 0.878$) (Fig. 21). La differenza tra i tre confronti numerici che ricadono all'interno del range delle piccole numerosità (1 vs. 2, 2 vs. 3, 3 vs. 4) e i due confronti che invece appartengono al range delle grandi numerosità (4 vs. 5, 5 vs. 6) è statisticamente significativa (ANOVA: $F_{(4,99)} = 2.953$, $p = 0.024$, contrasti: $t(95) = 28.804$, $p = 0.001$)

I risultati di questo esperimento mostrano come il limite nel sistema di discriminazione per le piccole numerosità negli individui di *Poecilia reticulata* a 24 ore di vita sembri essere pari a 4. Questo limite è lo stesso riscontrato in pesci adulti (Agrillo et al., 2008). Questi risultati confermerebbero che il sistema dei piccoli numeri è innato e presente sin dalla nascita in maniera completa.

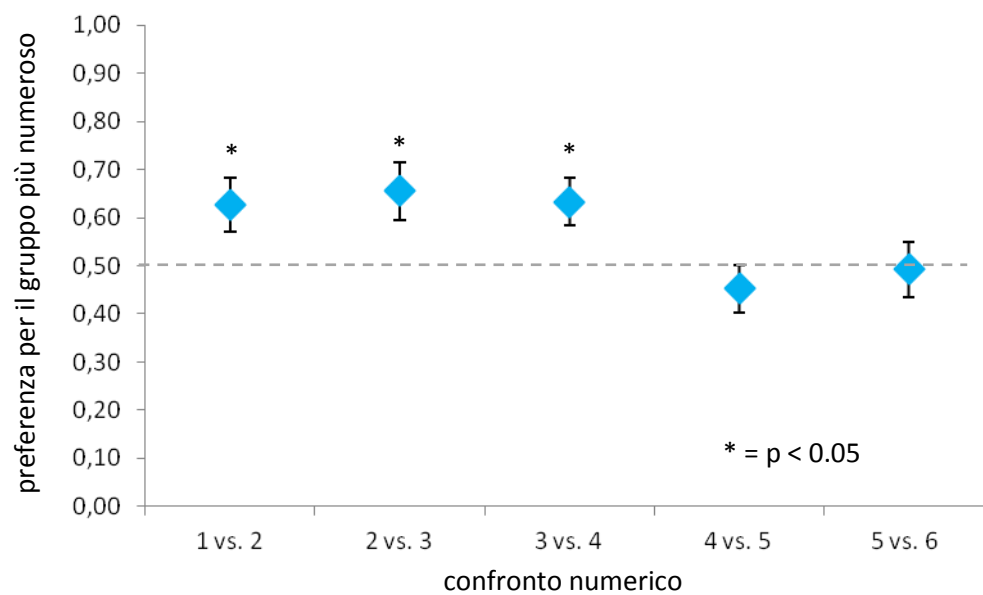


Fig. 21: I pesci a 24 ore di vita discriminano gruppi che differiscono di un elemento fino a 4 unità

3.3 Esperimento 5: Il ruolo della maturazione e dell'esperienza nello sviluppo dell'abilità di discriminare grandi numerosità

L'esperimento 3 ha evidenziato come gli avannotti a 24 ore di vita siano in grado di individuare il gruppo più numeroso quando le quantità a confronto sono inferiori alle 4 unità, ma falliscono nella discriminazione di quantità maggiori. Tuttavia, come dimostrato nella prima parte della tesi, gli adulti di *Poecilia reticulata* sono in grado di distinguere tra grandi quantità: per questo il presente esperimento si è proposto di indagare a quale età si sviluppi la capacità di discriminare l'insieme più numeroso tra 4 e 8 conspecifici e se tale capacità venga influenzata dalla possibilità di fare esperienza di gruppi di conspecifici nel periodo successivo alla nascita.

Soggetti

Sono stati sottoposti a test 144 soggetti a tre diverse età (1°, 20° e 40° giorno) in due diverse condizioni di allevamento (con o senza esperienza sociale).

Senza esperienza sociale

Tutti i soggetti appartenenti a questo gruppo sono stati stabulati a coppie in modo tale da minimizzare il ruolo dell'esperienza sociale. I soggetti venivano stabulati in una vasca di 32 x 19 x 16 cm e mantenuti in quell'ambiente sino al 1°, o 20° o 40° giorno d'età. Sono stati osservati 20 individui a un giorno di vita, 24 a 20 e 24 a 40 giorni d'età.

Con esperienza sociale

Per quanto concerne la stabulazione in gruppo, i soggetti venivano inseriti in vasche di 40 x 60 x 25 cm in gruppi con un minimo di 13 individui, in modo tale che, durante i giorni che precedevano il test, potessero fare esperienza di nuoto di gruppo e di gruppi di diversa numerosità. Due adulti (un maschio ed una femmina) di *Poecilia reticulata* venivano inseriti nella medesima vasca, al fine di simulare parzialmente le possibili minacce causate da predatori. È noto infatti che gli adulti di questa specie possono predare occasionalmente gli avannotti: la presenza di adulti quindi costituisce una minaccia per i piccoli simile a quella che possono incontrare nel loro ambiente naturale.

Sono stati sottoposti a test un totale di 78 individui allevati in gruppi: 32 sono stati osservati al 1° giorno di vita, 24 al 20° giorno di vita e 22 al 40° giorno.

Apparato e procedura sperimentale

L'apparato sperimentale utilizzato nei test con pesci a 24 ore di vita e a 20 giorni d'età è identico a quello descritto nell'esperimento 1. Anche in questo caso per i pesci di 40 giorni è stato impiegato un apparato identico ma di dimensioni adeguate alla grandezza dei soggetti.

La procedura sperimentale è la stessa descritta per i precedenti esperimenti e la misura di preferenza sociale è stata calcolata secondo la formula descritta precedentemente.

Risultati

Senza esperienza sociale

Per quanto riguarda i soggetti allevati in coppia sia i pesci sottoposti a test a 24 ore di vita che quelli osservati a 20 giorni d'età non hanno mostrato nessuna preferenza statisticamente significativa (rispettivamente: $t(19) = 0.103$, $p = 0.919$; $t(23) = 0.552$, $p = 0.586$), mentre i soggetti di 40 giorni d'età hanno trascorso più tempo verso il gruppo più numeroso ($t(21) = 2.413$, $p = 0.025$).

Con esperienza sociale

I soggetti allevati in gruppo a 24 ore di vita non hanno mostrato alcuna preferenza ($t(31) = 0.539$, $p = 0.593$), mentre gli individui sottoposti a test a 20 giorni di età hanno preferito in modo statisticamente significativo il gruppo più numeroso ($t(23) = 2.735$, $p = 0.012$), scelta confermata anche nei soggetti di 40 giorni d'età ($t(21) = 3.861$, $p = 0.001$) (Fig. 22).

In seguito è stata condotta un'ANOVA 2 x 2 x 3 in cui il fattore entro i soggetti era la "numerosità". Tale variabile corrisponde al tempo trascorso verso il gruppo più numeroso e il gruppo meno numeroso, misurato in secondi. I fattori tra i soggetti erano l'"esperienza" (individui allevati in gruppo/ individui senza esperienza sociale) e l'"età" (24 ore/ 20 giorni/ 40 giorni). Dall'analisi è emerso un effetto statisticamente significativo del fattore numerosità ($F_{(1,128)} = 10.788$, $p = 0.001$), del fattore esperienza ($F_{(1, 128)} = 6.144$, $p = 0.014$) e del fattore età ($F_{(2, 128)}$

= 4.746, $p = 0.010$). Nessun'interazione è risultata statisticamente significativa (tutte $p > 0.050$).

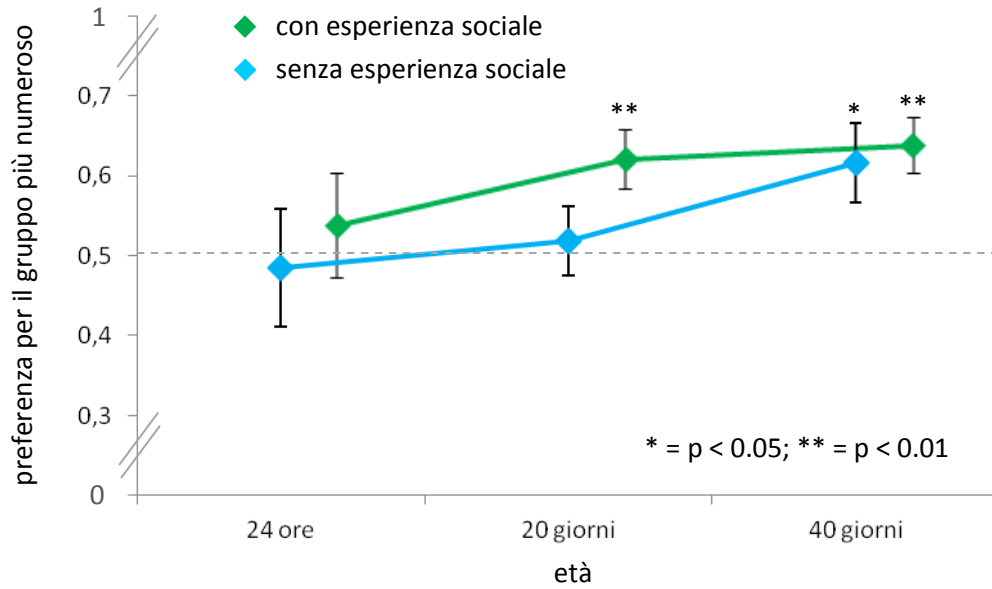


Fig. 22: La capacità di discriminare tra 4 e 8 conspecifici aumenta con lo sviluppo, inoltre l'esperienza tende ad accelerare questo processo.

3.4 *Discussione*

Gli esperimenti presentati nella sessione precedente hanno dimostrato che pesci adulti sottoposti ad un test di scelta spontanea sono in grado di discriminare tra due gruppi di conspecifici che differiscono di un'unità quando le numerosità non superano i 4 elementi, e che possono discriminare anche gruppi più grandi se uno è almeno il doppio dell'altro (ad esempio 4 vs. 8 e 5 vs. 10).

In questa sessione le abilità numeriche sono state indagate negli avannotti. I dati provenienti dall'esperimento 3 mostrano che pesci a 24 ore di vita preferiscono il gruppo più numeroso quando le quantità appartengono al range dei piccoli numeri (2 vs. 3), mentre non mostrano alcuna preferenza quando devono scegliere tra due grandi numerosità (4 vs. 8), anche se in questo secondo caso il rapporto numerico è più semplice. Inoltre è stato dimostrato che alla nascita la capacità di discriminare gruppi che differiscono per un elemento è la stessa mostrata dai pesci adulti e dai primati non umani, ed include tutti i confronti compresi nel range dei piccoli numeri (1 vs. 2, 2 vs. 3, e 3 vs. 4) ma non i confronti che coinvolgono numerosità oltre questo range, come ad esempio 4 vs. 5 e 5 vs. 6 (Agrillo et al., 2008; Wood et al., 2008). Molti studi in letteratura hanno dimostrato che i bambini hanno bisogno di rapporti numerici più semplici di quelli richiesti dagli adulti per riuscire a discriminare diverse quantità (Barth et al., 2003; Izard et al., 2009; Xu & Spelke, 2000; Lipton & Spelke, 2003). È quindi possibile che anche gli avannotti necessitino di rapporti numerici più favorevoli rispetto a quelli dei pesci adulti. Tuttavia, anche quando si presenta un confronto con un rapporto molto semplice (0.33) i pesci a 24 ore di vita non riescono a discriminare le due quantità. È importante notare che quando il confronto è tra piccole quantità gli avannotti invece sono in grado di discriminare rapporti numerici più difficili (0.50, 0.67 e 0.75). Quindi nei pesci l'abilità di discriminare tra piccole quantità sembra essere innata e presente alla nascita, mentre quella per le grandi quantità sembra svilupparsi più tardi.

Poiché nell'esperimento 1 è stato dimostrato che esemplari adulti di *Poecilia reticulata* sono in grado di discriminare 4 vs. 8, ci si è chiesti quando questa capacità emerga, confrontando pesci di diversa età. Inoltre è stato studiato il ruolo dell'esperienza, sottoponendo a test pesci allevati in due diverse

condizioni: in coppia o in gruppo. Nei pesci senza esperienza sociale questa capacità viene osservata al 40° giorno di vita, mentre per gli individui allevati in gruppo questa capacità è già presente al 20° giorno. Anche nei soggetti adulti il limite della capacità di discriminare grandi quantità è il rapporto 0.50: le capacità numeriche osservate negli adulti sono quindi già sviluppate a tre settimane d'età, ovvero molto prima della maturazione sessuale, che nelle condizioni di laboratorio viene raggiunta attorno alle 12-15 settimane. Lo sviluppo precoce delle abilità numeriche potrebbe essere dovuto al fatto che per un avannotto essere in grado di discriminare quale gruppo di conspecifici è il più numeroso è molto utile per la propria sopravvivenza. I piccoli di *Poecilia reticulata*, essendo già indipendenti alla nascita, devono infatti essere in grado di proteggersi da eventuali predatori e di trovare il cibo.

Per quanto riguarda i confronti fra i grandi numeri, si potrebbe supporre che la causa della prestazione al livello del caso sia di tipo motivazionale piuttosto che cognitivo; ad esempio è possibile che a 24 ore di vita i pesci non scelgano il gruppo più numeroso fra 4 e 8 conspecifici poiché a quest'età potrebbe esservi una tendenza ad evitare i gruppi troppo grandi. Tuttavia quest'interpretazione non viene confermata dai dati provenienti dal confronto 3 vs. 8, in cui vi è una preferenza significativa per il gruppo più numeroso. Il fatto che i neonati di *Poecilia reticulata* possano distinguere 3 vs. 4 e 3 vs. 8 ma non 4 vs. 8 sembra indicare che per loro il range dei piccoli numeri vada da 1 a 3, così come negli uccelli e nei bambini di 6 mesi (Rugani et al., 2008, Wynn, 1996). In quest'ottica gli avannotti sarebbero in grado di discriminare quando un numero supera il limite dei piccoli numeri, ma non sarebbero invece in grado di discriminare due numeri appartenenti al range delle grandi quantità, indipendentemente dalla loro distanza numerica: riconoscerebbero quindi che 4 è maggiore di 3 e che 8 è maggiore di 3, ma non sarebbero in grado di individuare il maggiore tra 4 e 8. Inoltre questi dati sembrerebbero suggerire che alla nascita non vi sia un conflitto tra le rappresentazioni dei piccoli e dei grandi numeri, e questo sarebbe dovuto alla mancanza del sistema analog magnitude che infatti emergerebbe solo con lo sviluppo. Al contrario, è possibile anche ipotizzare che per i neonati di *Poecilia reticulata* il numero 4 appartenga al range dei piccoli numeri e che quindi il

confronto 4 vs. 8 sia in realtà un confronto fra due range numerici differenti. In questo caso l'incapacità di compiere questa discriminazione sarebbe dovuta alla difficoltà di confrontare rappresentazioni differenti, piuttosto che a una mancanza del sistema analog magnitude. Tuttavia quest'interpretazione non converge con i dati descritti precedentemente che mostrano il successo degli avannotti nei confronti tra range diversi (2 vs. 5 e 3 vs. 8).

Questa serie di risultati non permette di spiegare il motivo per cui nei pesci la capacità di discriminare i piccoli numeri sia presente alla nascita, mentre quella per discriminare i grandi numeri si sviluppi più tardi come risultato sia della maturazione che dell'esperienza. Molti autori ritengono che la capacità di compiere giudizi numerici in modo rapido e accurato sia basata su un sistema di object-tracking (Trick & Pylyshyn, 1994; Uller et al., 1999). Questo sistema non sarebbe propriamente numerico, bensì sarebbe basato su un meccanismo che permette l'individuazione parallela di 3 o 4 oggetti anche quando essi si muovono nello spazio, o vengono occlusi per brevi periodi (Scholl & Pylyshyn, 1999; Trick & Pylyshyn, 1994). Secondariamente questo sistema potrebbe essere utilizzato anche per risolvere confronti numerici fra piccole numerosità. Una prova a sostegno del fatto che lo stesso meccanismo è responsabile sia dell'abilità di seguire degli stimoli che si muovono nello spazio, sia della capacità di individuare la numerosità di un piccolo insieme, viene da uno studio in cui a partecipanti adulti veniva richiesto di stimare il numero di stimoli presentati sullo schermo mentre eseguivano un secondo compito, che poteva essere o un compito di tracking o un compito di memoria di stringhe di lettere. I risultati mostrano come la prestazione nel compito di stima numerica decresca all'aumentare degli stimoli che dovevano essere seguiti nello spazio, mentre non è influenzata dal compito non visivo (Chesney & Haladjian, 2011). In base a quest'ipotesi è possibile supporre che da un punto di vista ecologico per gli avannotti potrebbe essere utile possedere la capacità di seguire la traiettoria di elementi nello spazio, come potenziali predatori, compagni sociali, o prede vive, e questa capacità potrebbe essere già presente alla nascita per favorire la loro sopravvivenza. Quindi, anche se i veri meccanismi numerici emergessero più avanti, i pesci neonati

potrebbero utilizzare il sistema dell'object tracking per risolvere semplici compiti numerici, come individuare il gruppo più numeroso.

Il confronto tra i risultati ottenuti con i pesci e quelli ottenuti con altre specie risulta difficile a causa di una forte lacuna in letteratura di dati sull'ontogenesi della cognizione numerica. Il solo confronto possibile è quello con la specie umana, che tuttavia è filogeneticamente molto distante dai pesci. Si sa molto poco sulla rappresentazione dei piccoli numeri in bambini di età inferiore ai 6 mesi. Un'eccezione è rappresentata dallo studio di Antell e Keating (1983) nel quale, attraverso una procedura di abituação e disabituação, è stato dimostrato che i neonati (con un'età compresa tra le 21 e le 44 ore) sono in grado di discriminare 2 da 3 ma non 4 da 6. Un altro studio ha riportato lo stesso pattern di risultati utilizzando stimoli sonori con un diverso numero di vocali e consonanti (Bijeljac-Babic et al., 1993). Queste ricerche sono in linea con la possibilità che nell'uomo, come nei pesci, l'abilità di discriminare piccole quantità sia presente alla nascita. Per quanto riguarda i grandi numeri, negli esseri umani, a differenza che nei pesci, a pochi giorni di vita è già presente la capacità di discriminare confronti in cui il rapporto numerico è molto favorevole, e con lo sviluppo questa capacità diventa sempre più precisa (Izard et al., 2009; Barth et al. 2003; Halberda & Feigenson, 2008; Lipton & Spelke, 2003).

In conclusione, nonostante alcune differenze questi esperimenti sottolineano molte similitudini tra i sistemi numerici dei pesci e quelli dei primati. In particolare la dissociazione temporale osservata in questi esperimenti tra la capacità di discriminare piccole quantità e quella di discriminare grandi quantità è un'ulteriore evidenza a sostegno dell'esistenza anche nei pesci di due sistemi numerici indipendenti per i due diversi range numerici.

4. Il ruolo delle variabili continue nei test di scelta spontanea

Le variabili continue, come l'area complessiva degli stimoli, lo spazio totale occupato, la somma del loro perimetro, la loro densità e chiarezza, possono permettere la discriminazione di quantità senza che sia necessario contare gli elementi (Agrillo et al., 2007; Clearfield & Mix, 1999; Feigenson et al., 2002). Negli esperimenti descritti in precedenza tali variabili non potevano essere controllate ed è possibile che i pesci abbiano utilizzato questo tipo di informazione anziché quella numerica per discriminare tra gruppi di compagni. Una strategia per rendere difficile l'accesso alle variabili continue in test di scelta spontanea fra diverse quantità è la presentazione sequenziale degli stimoli. In questa procedura gli stimoli sono visibili uno per volta, e quindi il soggetto non ha mai la possibilità di vedere l'insieme nella sua interezza (Beran, 2007; Hanus & Call, 2007; Irie-Sugimoto et al., 2009; Ward & Smuts, 2007). Per risolvere il compito il soggetto deve quindi osservare singolarmente ogni elemento e creare una rappresentazione globale dell'insieme; la stessa operazione deve essere compiuta per il secondo insieme, e infine le due rappresentazioni vengono messe a confronto (Beran, 2004; Beran & Beran, 2004; Hauser et al., 2000). Questo approccio è stato utilizzato in due esperimenti, allo scopo di valutare se i pesci siano in grado di compiere discriminazioni di quantità anche quando l'accesso alle informazioni non numeriche è reso difficile e se tale abilità sia presente fin dalla nascita.

4.1 Esperimento 6: Uso spontaneo dell'informazione numerica

In questo esperimento è stato indagato se i pesci siano in grado di discriminare il gruppo di conspecifici più numeroso basandosi unicamente sull'informazione numerica. L'apparato di scelta spontanea utilizzato negli esperimenti precedenti è stato modificato in modo tale che ciascuno stimolo fosse isolato in uno scompartimento e quindi il gruppo di pesci non fosse mai visibile nel suo insieme, ma solo un individuo alla volta, prevenendo così l'utilizzo di informazioni non numeriche come lo spazio totale occupato dal gruppo. Inoltre in

base alle indicazioni provenienti dagli esperimenti precedenti sono stati presentati due confronti numerici, uno tra piccole numerosità (2 vs. 3) ed uno tra grandi (4 vs. 8). Infine, allo scopo di escludere la possibilità che altri indicatori indiretti di numerosità potessero aver suggerito la dimensione dei gruppi, è stato condotto un terzo esperimento in cui la numerosità è stata resa ininfluyente eguagliando le due quantità (3 vs. 3) ma in cui è stata modificato il distanziamento tra gli stimoli.

In questo esperimento sono state utilizzate come soggetti sperimentali femmine adulte di *Gambusia holbrooki*. In lavori precedenti è stato dimostrato che le capacità di discriminazione di quantità in esemplari di *Gambusia holbrooki* sono del tutto paragonabili a quelle di *Poecilia reticulata*. Uno studio condotto con la procedura di scelta spontanea, infatti, ha dimostrato che sono in grado di discriminare quantità che differiscono per un solo elemento quando esse sono minori di 4, mentre per numerosità maggiori è necessario che il rapporto numerico sia minore o uguale a 0.50 (Agrillo et al., 2008).

Soggetti

I soggetti sperimentali usati provenivano dall'Oasi WWF Valle Averte di Lugo (Venezia) presso la quale sono state raccolte mediante reti a maglie fitte. In laboratorio i pesci sono stati stabulati in gruppi misti di 20-30 esemplari con un rapporto approssimativo di 1:1 tra i sessi in vasche di stoccaggio con pareti di vetro. I soggetti sono stati mantenuti in condizioni standard di laboratorio, simili a quelle descritte per i pesci adulti dell'esperimento 1. Sono stati condotti tre esperimenti, in ciascuno dei quali sono state sottoposte a test 18 femmine adulte, per un totale di 54 individui. I pesci stimolo erano individui dello stesso sesso e della stessa età dei soggetti, ciascun soggetto è stato sottoposto a test una sola volta, mentre gli stimoli potevano essere riutilizzati.

Apparato sperimentale

2 vs. 3

L'apparato sperimentale era formato da una vasca suddivisa in tre settori. Il settore centrale (60 x 40 cm) era a forma di clessidra, ovvero era composto da un corridoio che univa due aree identiche alle cui estremità erano visibili i settori

degli stimoli. Ciascun settore degli stimoli consisteva in un'area rettangolare (25 x 40 cm) suddivisa tramite dei pannelli in doppio vetro in 4 scomparti identici (25 x 10 cm), dove gli stimoli venivano inseriti singolarmente. In ogni area di preferenza sociale sono state poste 9 barriere in plastica verde (4 x 15 cm) allineate su una griglia 3 x 3, allo scopo di impedire al soggetto di vedere più di uno stimolo per volta. Il settore del soggetto era illuminato da due lampade al neon (8 W) poste centralmente sopra il corridoio, ciascun settore degli stimoli era illuminato da una lampada al neon (30 W). Sulle pareti che separavano i settori degli stimoli da quello del soggetto era posta un retino che fungeva da schermo unidirezionale, impedendo agli stimoli di poter vedere il soggetto (Fig. 23). L'acqua dell'apparato era mantenuta ad una temperatura di 25 ± 2 °C. Una videocamera era posta a circa un metro d'altezza sopra l'apparato e permetteva di registrar la posizione del soggetto durante il test.

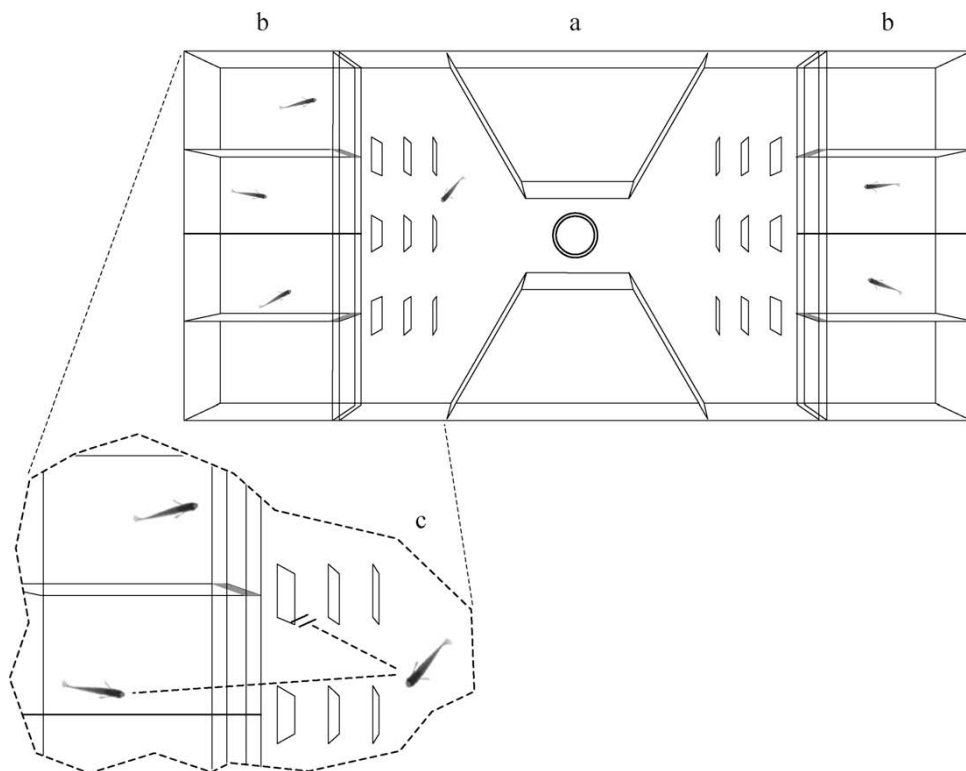


Fig. 23: Schema dell'apparato sperimentale. a) settore del soggetto b) settori degli stimoli, ciascun pesce era inserito singolarmente in uno scomparto c) da ogni punto della vasca il soggetto non poteva vedere più di uno stimolo per volta.

4 vs. 8 e 3 vs. 3

In questi confronti l'apparato sperimentale era simile a quello descritto per il confronto precedente, con la differenza che in questo caso il settore degli stimoli era più largo (54 cm) e suddiviso in 9 comparti (25 x 6 cm) e che nelle aree di scelta vi erano 24 barriere in plastica (2.5 x 15 cm) disposte su una griglia di 3 x 8.

Procedura sperimentale

Ciascuno stimolo veniva inserito in un diverso scomparto il pomeriggio del giorno precedente all'esperimento in maniera tale da permettere al pesce di ambientarsi. Il soggetto veniva inserito in un cilindro trasparente posto al centro dell'apparato, dopo un minuto il cilindro veniva alzato tramite un sistema a carrucola. Il test era suddiviso in due fasi di 60 minuti ciascuna. Nella prima il soggetto era lasciato libero di esplorare l'ambiente, nella seconda fase invece la posizione del soggetto veniva registrata. Allo scopo di assicurarsi che i soggetti fossero sufficientemente attivi e che avessero visto entrambi i gruppi stimolo, prima della seconda fase, i pesci che non avevano visitato entrambi i gruppi almeno 3 volte sono stati esclusi e sostituiti. In base a questo criterio sono stati esclusi e sostituiti 6 soggetti nel primo confronto, 5 nel secondo e 4 nel terzo.

Sia nei test tra piccole numerosità che in quello tra grandi la posizione del gruppo più numeroso era bilanciata tra le prove. Inoltre in metà delle prove è stata pareggiata la distanza tra ciascuno stimolo e nell'altra metà è stato pareggiato lo spazio totale occupato dal gruppo (ovvero la distanza tra i due pesci posti più lateralmente).

Lo scopo del terzo confronto era di verificare se la distanza tra i pesci e lo spazio totale occupato, ovvero le informazioni non numeriche, potessero influenzare la scelta dei soggetti. Per questo la numerosità è stata resa ininfluente eguagliando le due quantità (3 vs. 3) e in un settore gli stimoli sono stati inseriti uno adiacente all'altro minimizzando così lo spazio occupato (gruppo coeso), mentre nell'altro lo spazio è stato massimizzato lasciando due comparti vuoti tra gli stimoli (gruppo spaziato).

Per la misura della preferenza sociale, in questo esperimento è stato considerato il tempo, espresso in secondi, che i soggetti trascorrevano ad una distanza massima di 5 cm dai gruppi stimolo ovvero nelle due aree di preferenza sociale.

Risultati

Per i confronti 2 vs. 3 e 4 vs. 8 è stata condotta un'ANOVA 2 x 2 x 2 in cui il fattore entro i soggetti era la numerosità (gruppo più numeroso/ gruppo meno numeroso), mentre i fattori tra i soggetti erano la posizione del gruppo più numeroso (destra/ sinistra) e il tipo di variabile pareggiata (distanza tra gli stimoli/ spazio totale occupato) (Fig. 24).

2 vs. 3

Per quanto riguarda il confronto 2 vs. 3 è emerso che i soggetti hanno trascorso più tempo verso il gruppo più numeroso ($F_{(1,14)} = 7.420$, $p = 0.016$). La posizione degli stimoli e il modo in cui i gruppi erano stati pareggiati non hanno influenzato la prestazione dei soggetti (rispettivamente: $F_{(1,14)} = 0.180$, $p = 0.677$ e $F_{(1,14)} = 1.363$, $p = 0.263$). Nessuna interazione è risultata statisticamente significativa ($p > 0.40$).

4 vs. 8

Lo stesso pattern di risultati è stato trovato nel confronto 4 vs. 8: i soggetti hanno preferito il gruppo più numeroso ($F_{(1,14)} = 6.677$, $p = 0.022$), e non è emerso un effetto né della posizione degli stimoli ($F_{(1,14)} = 0.093$, $p = 0.765$) né del tipo di variabile pareggiata ($F_{(1,14)} = 0.053$, $p = 0.822$). Nessuna interazione è risultata statisticamente significativa ($p > 0.25$).

Inoltre non è emersa una differenza significativa tra la preferenza per il gruppo più numeroso nel confronto 2 vs. 3 e quella nel confronto 4 vs. 8 ($F_{(1,34)} = 0.316$, $p = 0.578$).

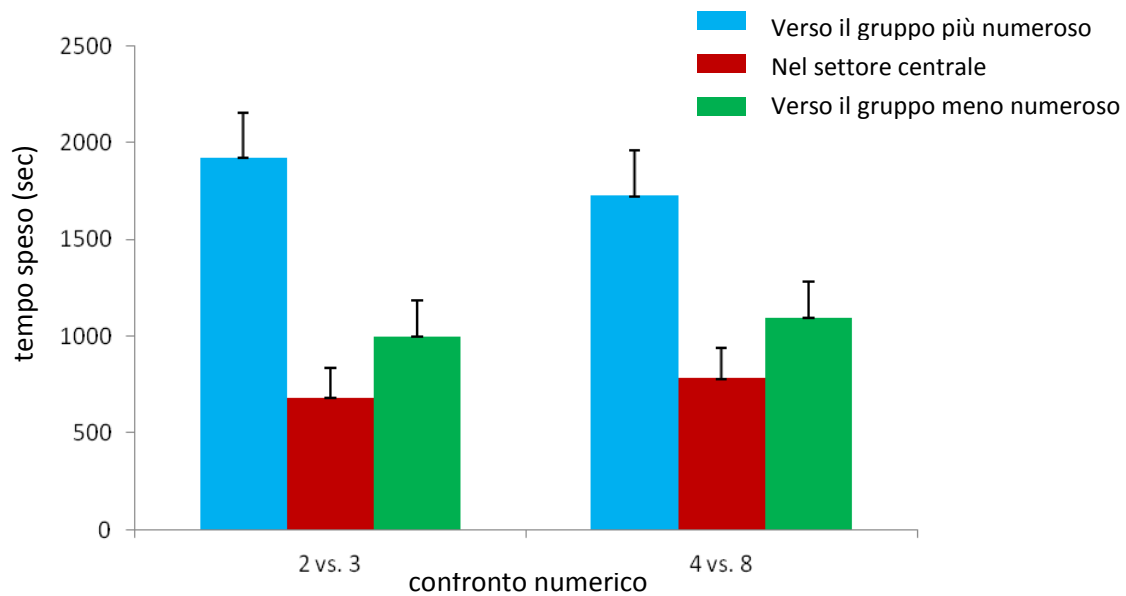


Fig. 24: *Il tempo trascorso nelle due aree di scelta e nel settore centrale nel confronto 2 vs. 3 e nel confronto 4 vs. 8*

3 vs.3

I dati del confronto 3 vs. 3 sono stati analizzati con un'ANOVA 2 x 2 in cui il fattore entro i soggetti era il modo in cui erano disposti gli stimoli (coeso/spaziato) e il fattore tra i soggetti era la posizione del gruppo più numeroso (destra/ sinistra). I risultati mostrano che non vi è alcuna preferenza per il gruppo coeso o quello spaziato (media \pm ds: 0.510 ± 0.366 ; $F_{(1,16)} = 0.004$, $p = 0.949$) e che la posizione dei gruppi non influenza la prestazione ($F_{(1,16)} = 2.025$, $p = 0.174$). Inoltre l'interazione non è statisticamente significativa ($p > 0.77$).

4.2 Esperimento 7: Uso spontaneo dell'informazione numerica nelle prime fasi dello sviluppo

Nel presente esperimento sono stati sottoposti a test pesci giovani, adottando una procedura di presentazione sequenziale degli stimoli analoga a quella descritta nello studio precedente, allo scopo di indagare se la capacità di discriminare diverse quantità anche quando l'accesso alle variabili continue è limitato sia presente fin dalle prime fasi dello sviluppo.

A differenza dello studio precedente, i presenti esperimenti sono stati condotti su esemplari di *Poecilia reticulata*, poiché i dati presenti in letteratura sull'ontogenesi della cognizione numerica riguardano questa specie. *Poecilia reticulata* rappresenta infatti un modello sperimentale più vantaggioso per gli studi ontogenetici poiché non vi sono gli stessi limiti pratici dovuti alle forti tendenze cannibalistiche riscontrate in *Gambusia holbrooki* verso gli esemplari giovani.

Anche in questo caso sono stati utilizzati due diversi confronti numerici, uno tra piccole numerosità (2 vs. 3) e uno tra grandi numerosità (4 vs. 8). I confronti sono stati presentati a pesci di diversa età, poiché come hanno mostrato i precedenti esperimenti la capacità di discriminare tra piccoli numeri è presente alla nascita, mentre quella tra grandi numeri sembra emergere più tardi ed essere accelerata dall'esperienza. Il primo confronto è stato quindi presentato a pesci di 24 ore di vita, mentre il secondo confronto è stato presentato a pesci di 20 giorni allevati in gruppo, e a pesci di 40 giorni allevati in coppia. In entrambi i test sono state controllate le possibili variabili che potevano fungere da indicatori di numerosità, ovvero lo spazio totale occupato dal gruppo, la distanza tra ciascuno stimolo e infine in una terza condizione gli stimoli sono stati disposti in maniera tale per cui il soggetto, percorrendo la distanza tra i pesci posti alle estremità di ogni gruppo, poteva osservare gli stimoli per la stessa quantità di tempo sia nel gruppo meno numeroso che in quello più numeroso (spazio di visibilità).

Soggetti

2 vs. 3

Sono stati utilizzati 48 individui di *Poecilia reticulata* ad un giorno di vita, 16 per ciascuna condizione sperimentale. Prima di essere sottoposti al test i pesci sono stati stabulati a coppie secondo le modalità descritte nell'esperimento 1. Ciascun soggetto è stato utilizzato solo una volta mentre gli stimoli, che avevano la stessa età del soggetto, potevano essere riusati più volte.

4 vs. 8

Sono stati utilizzati un totale di 72 individui di *Poecilia reticulata*. I soggetti appartenevano a due diverse condizioni di allevamento: con o senza esperienza sociale, come descritto nell'esperimento 5. Trentasei soggetti erano allevati in un gruppo formato da 13-16 individui e sono stati sottoposti a test a 20 giorni di vita, altri 36 soggetti invece erano allevati in coppia e sono stati sottoposti a test a 40 giorni di vita. Per ciascun gruppo d'età sono stati sottoposti a test 12 individui in ciascuna delle tre condizioni di controllo delle variabili continue. Ogni individuo è stato osservato una sola volta. Gli stimoli avevano la stessa età dei soggetti e potevano essere utilizzati più volte.

Apparato sperimentale

2 vs. 3

L'apparato sperimentale era simile a quello usato nel precedente studio di scelta spontanea con presentazione sequenziale degli stimoli (esperimento 6), ma di dimensioni adeguate a quelle degli avannotti (Fig. 25). Esso era costituito da tre settori. L'area del soggetto misurava 18.5 x 15.5 cm ed aveva le pareti laterali ed il fondo coperti di polipalck bianco, mentre gli altri due lati erano in vetro sintetico. Lungo ciascuna delle due pareti laterali, in posizione centrale, era collocato un trapezio di polipack bianco; queste due strutture formavano un corridoio di 10.5 cm di larghezza, che aveva la funzione di facilitare la connessione tra le due zone adiacenti alle aree degli stimoli. Queste ultime si trovavano ad una distanza di 1.5 cm dall'area del soggetto ed erano costituite ciascuna da un settore di 7.5 x 15.5 cm, a sua volta suddiviso in cinque scomparti

identici di 6 x 2.6 cm, che erano isolati visivamente tra loro da pareti di vetro opaco. Gli stimoli venivano inseriti solo nei tre scompartimenti centrali.

Per impedire al soggetto di vedere più di uno stimolo nello stesso momento, nelle due zone dell'area del soggetto adiacenti alle aree degli stimoli vi erano otto barriere di poliplack verde, di 1.6 x 6 cm, disposte secondo una griglia 4 x 2. In questo modo il soggetto, muovendosi liberamente all'interno dell'apparato, poteva vedere gli stimoli in sequenza, ma mai più di uno per volta. A ridosso delle pareti laterali, vi erano altre quattro barriere di dimensione di 0.8 x 6 cm, che avevano la funzione di pareggiare la larghezza dei corridoi laterali con quella dei corridoi tra le barriere.

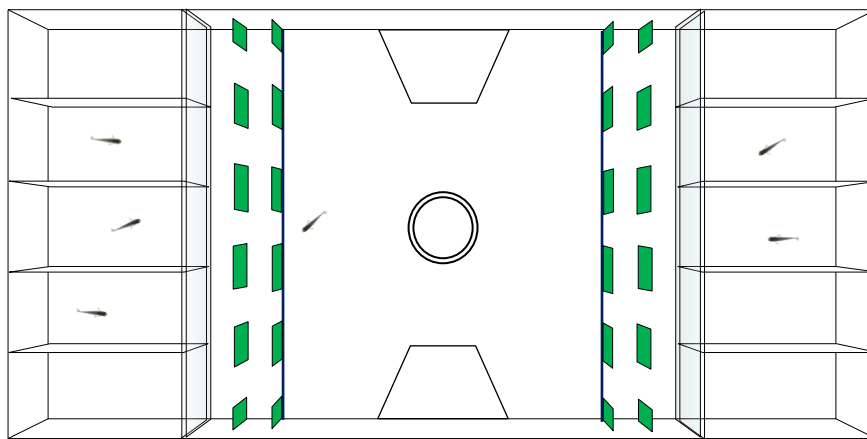


Fig. 25: *Rappresentazione schematica dell'apparato sperimentale. Da ogni punto del settore centrale i soggetti potevano vedere solo uno stimolo per volta*

Al fine di favorire la comunicazione olfattiva, la superficie inferiore di ognuno dei tre settori era forata, in modo che l'acqua circolasse in un contenitore comune di poliplack bianco posto sotto le vasche. Il fondo di ognuno dei tre settori era ricoperto di una rete bianca di 0.1 x 0.1 cm di maglia.

L'area del soggetto era illuminata da una lampada al neon da 8 W posta in posizione centrale ad una altezza di 25 cm dal fondo. Le aree degli stimoli erano entrambe illuminate con una lampada al neon da 8 W. Durante l'esperimento l'apparato era riempito con 4 cm di acqua mantenuta alla temperatura di $25 \pm 2^\circ\text{C}$.
4 vs. 8

Per questo esperimento è stata utilizzata una modifica dell'apparato sperimentale descritto per il confronto 2 vs. 3. La struttura dell'apparato è stata

mantenuta identica, ma adattata per ospitare un maggior numero di stimoli (Fig. 26). I tre settori sono stati ingranditi per essere adeguati alla grandezza dei pesci. Le dimensioni dell'area del soggetto erano 48 x 35.6 cm mentre quelle delle aree degli stimoli erano 48 x 13.5 cm. Le aree degli stimoli in questo caso sono state internamente suddivise in 8 settori identici di dimensioni 4 x 12 cm e tenute alla distanza di 1.5 cm dall'area del soggetto. Di conseguenza è stato aumentato anche il numero delle barriere opache sulla base dell'area del soggetto; queste sono state disposte secondo una griglia 7 x 2 per un totale di 14 barriere per lato. Ogni barriera misurava 2.7 x 8 cm.

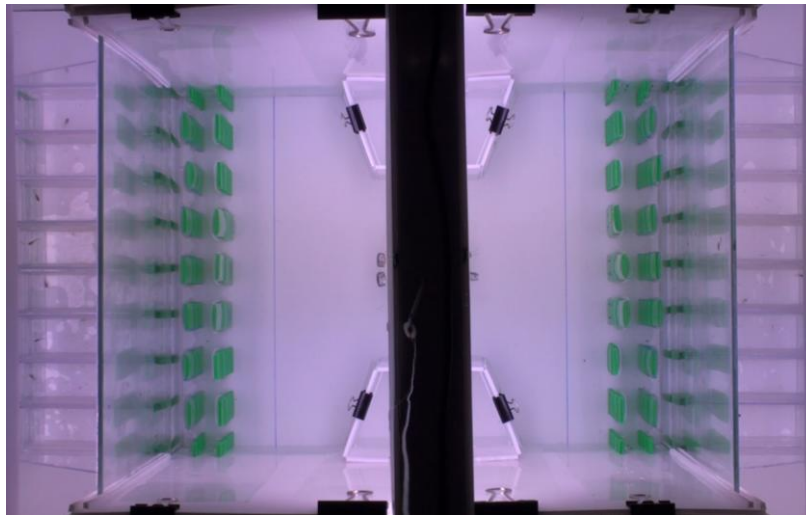


Fig. 26: *Fotografia dell'apparato sperimentale utilizzato con i soggetti di 20 e 40 giorni.*

L'area del soggetto era illuminata da una lampada al neon da 18 W posta in posizione centrale ad una altezza di 35 cm dal fondo. Le aree degli stimoli erano entrambe illuminate con una lampada al neon da 18 W, posizionata direttamente sopra i settori contenenti gli stimoli. Durante l'esperimento l'apparato veniva riempito con 7 cm di acqua mantenuta alla temperatura di 25 ± 2 °C.

Procedura sperimentale

La procedura sperimentale era identica in entrambi i confronti numerici. Gli stimoli venivano inseriti singolarmente negli scompartimenti delle aree degli stimoli e lasciati in ambientamento per 10 minuti. Al termine di tale periodo un

soggetto sperimentale veniva prelevato dalla vasca di stoccaggio e collocato all'interno di un cilindro di vetro sintetico trasparente posizionato al centro del corridoio dell'area del soggetto per un periodo di 2 minuti. Dopo tale periodo, il cilindro veniva sollevato dall'esterno attraverso un sistema a carrucole e il soggetto liberato all'interno dell'apparato. Il soggetto poteva esplorare liberamente l'ambiente per 120 minuti. Trascorso tale periodo la posizione del soggetto veniva registrata per 60 minuti. Terminato il test il soggetto veniva prelevato dall'apparato e stabulato in una vasca di stoccaggio in un gruppo di individui della stessa età. Successivamente un nuovo soggetto sperimentale veniva prelevato ed inserito nell'apparato.

A metà dei soggetti dell'intero campione sperimentale il gruppo di conspecifici di numerosità maggiore è stato presentato sulla destra dell'apparato, mentre all'altra metà sulla sinistra. In ogni sessione giornaliera di prove la

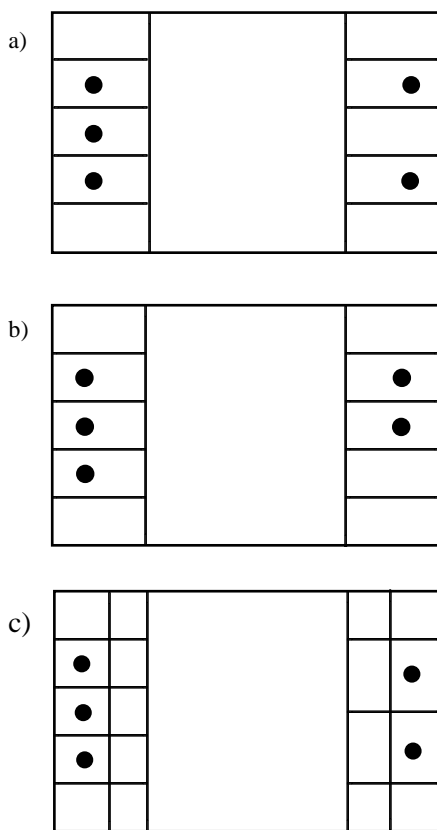


Fig. 27: Rappresentazione schematica delle tre condizioni sperimentali. a): spazio totale controllato; b): distanza tra stimoli controllata; c): spazio di visibilità controllato.

disposizione degli stimoli veniva invertita così da escludere l'influenza causata da eventuali artefatti legati all'apparato.

Allo scopo di controllare le variabili continue, le prove sono state suddivise in tre gruppi in cui variava la disposizione degli stimoli (Fig. 27). Nel primo caso è stato pareggiato lo spazio totale occupato dagli stimoli, in modo che la distanza tra i due stimoli alle estremità fosse la stessa per entrambi i gruppi. Nel secondo caso è stato controllata la densità: gli stimoli erano posti in scompartimenti adiacenti in entrambi i gruppi, così da pareggiare la distanza reciproca tra gli stimoli. Infine in una terza condizione gli stimoli venivano disposti in

maniera tale per cui il soggetto, percorrendo la distanza tra i pesci posti alle estremità di ogni gruppo, potesse osservare gli stimoli

per la stessa quantità di tempo sia nel gruppo meno numeroso che in quello più numeroso. Per ottenere questo scopo è stato necessario modificare l'apparato. Nel caso del confronto 2 vs. 3 i tre scompartimenti centrali dell'area degli stimoli del gruppo meno numeroso sono stati uniti in due soli scompartimenti di 4.1 x 2.4 cm, mentre quelli del gruppo più numeroso erano di 2.6 x 3 cm. Inoltre, nella zona dell'area del soggetto vicina al gruppo meno numeroso, le barriere di poliplack verde erano cinque, di cui le tre centrali misuravano 2.4 x 6 cm, mentre quelle adiacenti alle pareti misuravano 0.8 x 6 cm. Analogamente le stesse tipologie di modifiche sono state apportate nell'apparato utilizzato per il confronto 4 vs. 8.

Per la misura della preferenza sociale, in questo esperimento è stato considerato il tempo, espresso in secondi, che i soggetti trascorrevano nelle due aree di preferenza sociale; ciascuna di esse corrispondeva ad un quinto dell'area del soggetto. Nell'apparato utilizzato per il confronto 2 vs. 3 era larga 3.7 cm, mentre nell'apparato di 4 vs. 8 era larga 9.6 cm.

I soggetti che non avevano attraversato l'area del soggetto da un'estremità all'altra per almeno 14 volte nel corso dei primi 120 minuti di osservazione sono stati esclusi dalle analisi e sostituiti con altri soggetti. La soddisfazione di questo criterio garantiva che il pesce sottoposto a test fosse sufficientemente attivo ed avesse visitato entrambi i gruppi-stimolo per un numero adeguato di volte.

Risultati

2 vs. 3

I dati sono stati analizzati con un'ANOVA 2 x 2 x 3 dove il fattore entro i soggetti era la numerosità (gruppo più numeroso/ gruppo meno numeroso) mentre i fattori tra i soggetti erano la posizione del gruppo più numeroso (destra/ sinistra) e la variabile continua controllata (spazio totale occupato/ distanza tra gli stimoli/ spazio di visibilità).

I risultati mostrano che i soggetti hanno trascorso più tempo verso il gruppo più numeroso ($F_{(1,42)} = 10.999$, $p = 0.002$). Inoltre la prestazione dei soggetti non risulta essere influenzata né dalla posizione del gruppo più numeroso ($F_{(1,42)} = 1.252$, $p = 0.270$) né dalle variabili controllate ($F_{(2,42)} = 2.742$, $p = 0.076$). Nessuna interazione è risultata statisticamente significativa ($p > 0.050$).

4 vs. 8

I dati sono stati analizzati tramite un'ANOVA 2 x 2 x 3 x 2. Il fattore entro i soggetti era la numerosità (gruppo più numeroso/ gruppo meno numeroso) mentre i fattori tra i soggetti erano la posizione del gruppo più numeroso (destra/ sinistra), la variabile continua controllata (spazio totale occupato/ distanza tra gli stimoli/ spazio di visibilità) e l'esperienza (con esperienza sociale/ senza esperienza sociale).

I soggetti hanno trascorso più tempo verso il gruppo più numeroso ($F_{(1,60)} = 12.648$, $p = 0.001$), e in particolare i soggetti allevati in gruppo hanno passato più tempo verso gli stimoli rispetto ai soggetti allevati a coppie ($F_{(1,60)} = 8.527$, $p = 0.005$). La prestazione non è influenzata né dalla posizione del gruppo più numeroso ($F_{(1,60)} = 0.030$, $p = 0.864$) né dalle variabili continue controllate ($F_{(2,60)} = 2.930$, $p = 0.061$). Nessuna interazione è risultata statisticamente significativa ($p > 0.050$) (Fig. 28).

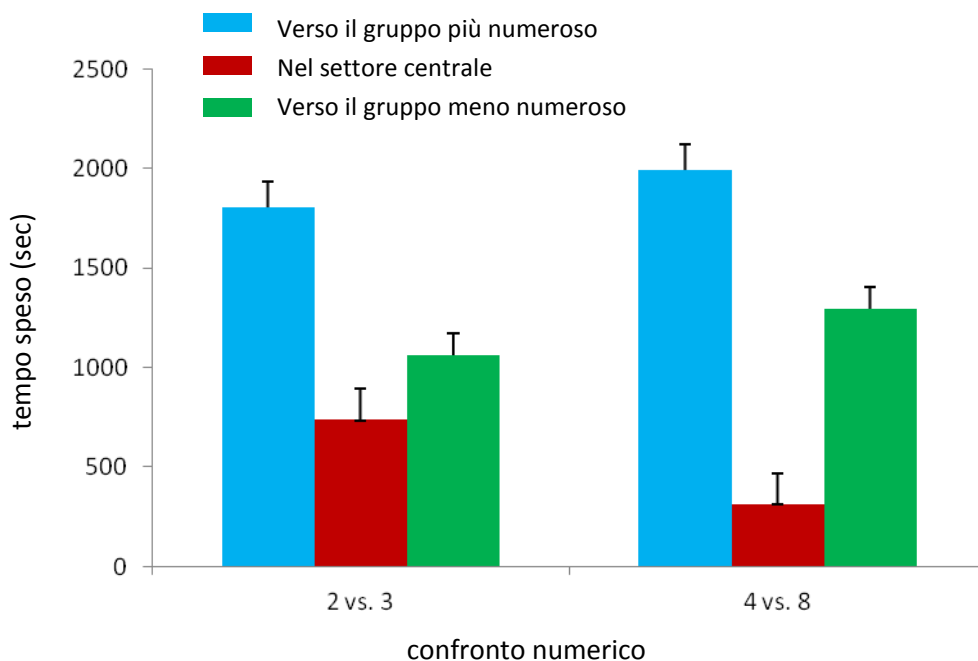


Fig. 28: Il tempo trascorso nelle due aree di scelta e nel settore centrale nel confronto 2 vs. 3 e nel confronto 4 vs. 8

4.3 Discussionione

Negli ultimi anni è stato dimostrato che molte specie animali sono in grado di discriminare spontaneamente quale sia il gruppo numeroso, mentre solo per pochi animali è stato appurato che nel compiere tali discriminazioni essi si affidano realmente al numero (Beran, 2004, 2007; Hauser et al., 2000; Hunt et al., 2008; Kilian et al., 2003; West & Young, 2002).

Negli studi con le scimmie o con i bambini una strategia spesso utilizzata per rendere difficile l'accesso alle variabili continue è la presentazione sequenziale degli stimoli, che impedisce ai soggetti di vedere l'insieme nella sua interezza (Wynn, 1992; Beran, 2007; Hauser et al., 2000). Negli esperimenti 6 e 7 questa procedura è stata adattata ai pesci in modo da poter investigare se siano in grado di discriminare tra due piccole quantità (2 vs. 3) e tra grandi quantità (4 vs. 8) facendo affidamento unicamente sul numero. Inoltre per poter verificare se tale abilità sia presente già alla nascita sono stati sottoposti a test pesci a diverse età. L'apparato di scelta spontanea è stato quindi modificato allo scopo di ridurre l'accesso alle variabili continue. I pesci, sia adulti che giovani, sono stati in grado di discriminare il gruppo più numeroso, fornendo così le prime evidenze che anche i pesci possono utilizzare spontaneamente l'informazione numerica.

Si potrebbe però contestare che in ogni condizione i soggetti avevano a disposizione un indicatore di numerosità, oltre al numero stesso. Ad esempio, nelle prove in cui veniva pareggiato lo spazio totale occupato i gruppi differivano per la distanza tra i soggetti, e viceversa. Tuttavia le analisi dimostrano che in entrambi i confronti numerici non vi è alcuna differenza tra la prestazione dei soggetti nelle due tipologie di prove, quindi è possibile escludere quest'ipotesi. Inoltre nella terza condizione dell'esperimento condotto sui soggetti adulti, in cui l'informazione numerica veniva annullata (3 vs. 3), i soggetti non mostrano alcuna preferenza per uno dei due gruppi, dimostrando così che la loro prestazione non è influenzata né dalla distanza tra gli stimoli né dallo spazio occupato dal gruppo stimolo.

Nei compiti di discriminazione numerica condotti attraverso la presentazione sequenziale degli stimoli solitamente vengono controllate anche le variabili temporali (ad esempio la durata totale della presentazione), che infatti

potrebbero influenzare la prestazione dei soggetti (Beran, 2007; Beran & Beran, 2004). Nell'esperimento condotto sui pesci adulti i soggetti impiegavano più tempo per vedere il gruppo più numeroso rispetto al minore, poiché dovevano percorrere una distanza più grande per vedere ciascun scompartimento nel quale si trovavano gli stimoli. Le analisi mostrano però che in tutti e tre i confronti numerici il controllo dello spazio totale del gruppo non influenza la preferenza dei soggetti, suggerendo così che la discriminazione non sia basata su informazioni temporali. Per quanto riguarda gli esperimenti condotti sui pesci giovani questa possibilità è stata esclusa sottoponendo i pesci ad una condizione in cui il tempo di visibilità degli stimoli veniva pareggiato. I risultati mostrano che questa variabile non influenza la scelta dei soggetti.

Da un punto di vista evolutivo sembra essere molto importante possedere la capacità di usare l'informazione numerica per discriminare quale sia il gruppo più numeroso, poiché in natura spesso gli stimoli non sono visibili simultaneamente e possono essere in parte occlusi. La capacità di utilizzare il numero sembra quindi essere cruciale quanto quella di utilizzare le altre variabili continue come la densità, lo spazio totale occupato, la quantità di movimento, etc. In studi precedenti queste variabili sono risultate essere gli indicatori di quantità utilizzati spontaneamente dai pesci per discriminare il gruppo più numeroso quando gli stimoli sono visibili simultaneamente. In particolare l'area complessiva viene utilizzata per i confronti tra i piccoli numeri (2 vs. 3) mentre per i grandi numeri (4 vs. 8) viene utilizzata anche la quantità di movimento (Agrillo et al., 2008). Negli esperimenti qui presentati è stato dimostrato che in diverse condizioni i pesci sono in grado di risolvere gli stessi confronti numerici utilizzando solo l'informazione numerica. Il confronto tra questi risultati e quelli dello studio precedente indica che i pesci possono fare affidamento a diversi indicatori per discriminare fra due quantità e che la preferenza spontanea ad usare un tipo di indicatore dipende dal tipo di contesto e dal tipo di compito. Discriminare quale gruppo di conspecifici sia il più numeroso potrebbe infatti essere un compito complesso: i pesci all'interno dei gruppi potrebbero muoversi, cambiare orientamento, non essere sempre tutti visibili contemporaneamente. In queste condizioni potrebbe quindi essere vantaggioso possedere la capacità di

elaborare diverse caratteristiche degli stimoli e di basare la discriminazione numerica su diverse combinazioni di indicatori a seconda del contesto, del tempo a disposizione per compiere la scelta, del rapporto numerico fra i gruppi. Recenti studi condotti sia sull'uomo che sui primati non umani riportano dati in linea con quest'ipotesi: ad esempio, è stato dimostrato che gli esseri umani adulti in un compito in cui devono discriminare tra due insiemi di pallini elaborano spontaneamente e automaticamente l'informazione riguardo la dimensione degli stimoli, l'area complessiva e il numero. Quando il confronto numerico proposto ha un rapporto semplice l'elaborazione dell'informazione numerica risulta essere più veloce di quella delle altre variabili continue, viceversa quando il rapporto numerico è più difficile (Hurewitz et al., 2006). Anche studi condotti su bambini in età pre verbale evidenziano che i bambini si affidano sia alla numerosità che alle informazioni non numeriche. L'utilizzo di un indicatore dell'uno piuttosto che dell'altro tipo dipende dal compito: nei confronti fra grandi numeri ad esempio viene preferita l'informazione numerica (Cordes & Brannon, 2008b). Infine, come descritto nell'introduzione, anche i macachi sembrano elaborare spontaneamente l'informazione numerica, anche quando le variabili continue sono disponibili. In particolare, quando le informazioni numeriche e non numeriche sono in contraddizione le scimmie preferiscono affidarsi al numero se il rapporto numerico è facile e se hanno già avuto esperienza di compiti di discriminazione numerica (Cantlon & Brannon, 2007b).

Questi dati non permettono di escludere a priori un'interpretazione alternativa. È infatti possibile che i pesci abbiano elaborato le variabili non numeriche come lo spazio totale occupato dal gruppo e la distanza tra gli stimoli e le abbiano immagazzinate nella memoria a breve termine, e abbiano quindi utilizzato queste informazioni piuttosto che il numero per individuare il gruppo di conspecifici più numeroso. In uno studio condotto su bambini di 12 mesi d'età che utilizzava la procedura della presentazione sequenziale degli stimoli, ai partecipanti veniva data la possibilità di scegliere tra due contenitori dopo che questi erano stati riempiti con dei pezzi di crackers. I bambini hanno scelto quello contenente il maggior numero di pezzi nei confronti 1 vs. 2 e 2 vs. 3 mentre la scelta è stata a livello del caso quando i confronti erano tra numerosità maggiori.

Tuttavia nella condizione in cui i pezzi di crackers avevano dimensioni diverse la scelta era determinata dallo spazio totale occupato dagli elementi o dal volume e non dal numero. Gli autori sostengono che questi risultati riflettono l'utilizzo da parte dei bambini di rappresentazioni del volume e dello spazio occupato piuttosto che una corrispondenza uno ad uno tra i pezzi di cibo e il numero di rappresentazioni formate dal sistema object-file (Feigenson et al., 2002). È bene però sottolineare che in questo esperimento gli stimoli erano costituiti da cibo ed è facile immaginare che la selezione naturale abbia portato alla formazione di un sistema quantitativo che massimizza la quantità di cibo e quindi di calorie piuttosto che il numero di pezzi, quindi la scelta della maggior quantità di cibo sarebbe indipendente dalla capacità o meno di basarsi solo sull'informazione numerica. Per quanto riguarda gli esperimenti qui presentati in base a quest'ipotesi si dovrebbe assumere che i pesci immagazzinino le variabili continue di ogni stimolo e che le sommino mentalmente per poi confrontarle con la somma dei pesci del secondo gruppo. Anche se quest'ipotesi rimane possibile, sembra essere una spiegazione meno parsimoniosa poiché richiederebbe sia la capacità di creare una rappresentazione per ogni stimolo che includa le loro variabili continue sia la capacità di memorizzare e sommare fino a otto diverse aree.

Questi dati rappresentano la prima evidenza a sostegno del fatto che i pesci sono in grado di discriminare spontaneamente il gruppo di conspecifici più numeroso basando la loro scelta unicamente sull'informazione numerica.

5. L'elaborazione delle variabili continue

Gli esperimenti precedenti hanno mostrato le prime evidenze a favore della capacità nei pesci di utilizzare spontaneamente l'informazione numerica per compiere discriminazioni di quantità. Tuttavia attraverso il paradigma di scelta spontanea è difficile ottenere un controllo sistematico di tutte le variabili continue. Per questo negli esperimenti che seguono è stata adottata una procedura di addestramento, grazie alla quale è possibile controllare in modo più efficace le informazioni non numeriche.

Uno studio precedente aveva dimostrato che i pesci nell'apprendere discriminazioni tra piccoli numeri spontaneamente si affidano all'area complessiva degli elementi e allo spazio totale occupato, sebbene siano anche in grado di usare l'informazione numerica quando l'accesso a queste variabili viene impedito (Agrillo et al., 2009). Lo stesso pattern di risultati è stato trovato anche in altre specie e per questo alcuni autori hanno suggerito che l'elaborazione del numero sia cognitivamente più complessa (Clearfield & Mix, 1999, 2001; Davis & Pérusse, 1998; Kilian et al., 2003). Gli autori che hanno proposto che il numero sia utilizzato dagli animali unicamente come ultima risorsa implicitamente assumono che vi sia una discontinuità tra gli esseri umani e gli animali non umani e quindi i sistemi alla base delle capacità numeriche sarebbero differenti fra le diverse specie. Secondo quest'ottica le similitudini tra le capacità numeriche delle diverse specie sarebbero quindi la conseguenza di un'evoluzione convergente piuttosto che il frutto di uno stesso sistema ereditato da un antenato comune (Braaten, 1988; Davis & Memmott, 1982; Seron & Pesenti, 2001). Anche le recenti scoperte che, in alcuni contesti, i bambini in età pre verbale e le scimmie utilizzano spontaneamente l'informazione numerica nonostante la disponibilità delle variabili continue possono rientrare in questa visione: la discontinuità potrebbe infatti essere tra i primati non umani e le altre specie animali, così come già ipotizzato per altri domini della cognizione, ad esempio la teoria della mente (Call & Tomasello, 2008; Povinelli & Vonk, 2003). Ad oggi però il quadro in letteratura è più complesso: vi sono nuove evidenze che dimostrano che anche gli uccelli possono elaborare spontaneamente il numero così come i primati

(Emmerton & Renner, 2009; Rugani et al., 2009). La questione rimane quindi ancora aperta poiché la maggior parte dei dati a sostegno dell'ipotesi del numero come ultima risorsa sono delle prove indirette. Alcune tra queste sono il fatto che per discriminare diverse quantità gli animali hanno bisogno di un lungo addestramento (Brannon & Terrace, 1998; Breukelaar & Dalrymple-Alford, 1998) o che quando sono disponibili sia le informazioni numeriche che quelle non numeriche gli animali si affidano preferenzialmente a quest'ultime (Agrillo et al., 2008, 2009; Kilian et al., 2003). Fino ad ora non vi sono studi che abbiano valutato direttamente l'ipotesi che il numero sia cognitivamente più difficile da elaborare rispetto alle variabili continue.

5.1. Esperimento 8: Il costo cognitivo del numero e delle variabili continue

Per verificare direttamente quest'ipotesi, nel presente esperimento esemplari adulti di *Gambusia holbrooki* sono stati addestrati a discriminare tra due e tre elementi in tre differenti condizioni. In una condizione, i soggetti potevano utilizzare unicamente l'informazione numerica; nella seconda i pesci potevano utilizzare unicamente le variabili continue, mentre nell'ultima condizione sono state rese loro disponibili sia le informazioni numeriche che quelle non numeriche. Se l'informazione numerica è davvero più difficile da elaborare, ci si attende un maggior numero di prove per apprendere il compito quando è la sola disponibile rispetto alla condizione in cui le variabili continue o entrambi i tipi d'informazione sono presenti.

Soggetti

Sono state addestrate un totale di 18 femmine adulte di *Gambusia holbrooki*. I pesci provenivano dall'Oasi WWF Valle Averte di Lugo (Venezia) e in laboratorio sono stati stabulati in gruppi misti di 20-30 esemplari con un rapporto approssimativo di 1:1 tra i sessi in vasche di stoccaggio con pareti di vetro. I soggetti sono stati mantenuti secondo le stesse condizioni descritte per l'esperimento 1.

Apparato sperimentale e stimoli

L'apparato sperimentale era composto da un contenitore cubico di poliplack bianco (16 x 16 x 16 cm) inserito in una vasca di maggiori dimensioni (60 x 26 x 36 cm) al cui interno era presente vegetazione e nella quale venivano posti dei conspecifici con funzione di rinforzo sociale (Sovrano et al., 2002; 2005). Ai due angoli del contenitore delimitato dalle pareti di poliplack erano presenti due piccoli corridoi (3 x 4 x 2.5 cm) posti a 2 cm di altezza. Solamente il corridoio associato alla numerosità rinforzata permetteva di uscire nella vasca esterna e di potersi congiungere con i propri compagni; la parte terminale del corridoio presentava, infatti, una lastra di acetato trasparente incollata alla parte superiore che poteva essere facilmente piegata dal pesce; il corridoio associato con la numerosità non rinforzata non permetteva, invece, di uscire nella vasca esterna essendo bloccato da una lastra di vetro sintetico in corrispondenza dell'uscita. Gli stimoli erano posti all'altezza di 1 cm sopra i due corridoi e venivano presentati tramite l'utilizzo di pannelli rimovibili che permettevano allo sperimentatore di cambiare in maniera sistematica la posizione in cui presentare le coppie di stimoli dentro l'apparato, in modo tale da evitare che la risposta dei soggetti potesse essere in qualche modo influenzata da caratteristiche spaziali dell'ambiente piuttosto che dalla componente numerica degli stimoli. Una rappresentazione dell'apparato cubico e della struttura dei pannelli rimovibili è schematizzata in figura 29.

Sono state utilizzate le stesse forme geometriche adottate nello studio di Agrillo e collaboratori (2009), consistenti in figure di diversa forma, dimensione e chiarezza, scelte da un insieme di circa 120 elementi e posizionati su di uno sfondo bianco. In dettaglio gli elementi potevano essere cerchi, quadrati, rettangoli, rombi, triangoli, stelle e croci. Sono stati creati tre differenti set di stimoli. Il primo set era composto da 60 coppie di 2 e 3 figure controllate per variabili continue quali l'area complessiva, la chiarezza e lo spazio totale occupato dalla configurazione (condizione chiamata "esclusivamente numerica"). Il secondo set era composto da 60 coppie in cui l'informazione numerica veniva resa irrilevante (1 vs. 1) mentre il rapporto tra la grandezza degli elementi di ciascuna coppia era sempre di 2/3 (condizione chiamata "solo variabili continue").

Il terzo set era composto infine da 60 coppie di 2 e 3 figure non controllate per le variabili continue nelle quali quindi sia la numerosità che le caratteristiche non numeriche potevano essere utilizzati per la discriminazione (condizione chiamata quindi “numeri + variabili continue”).

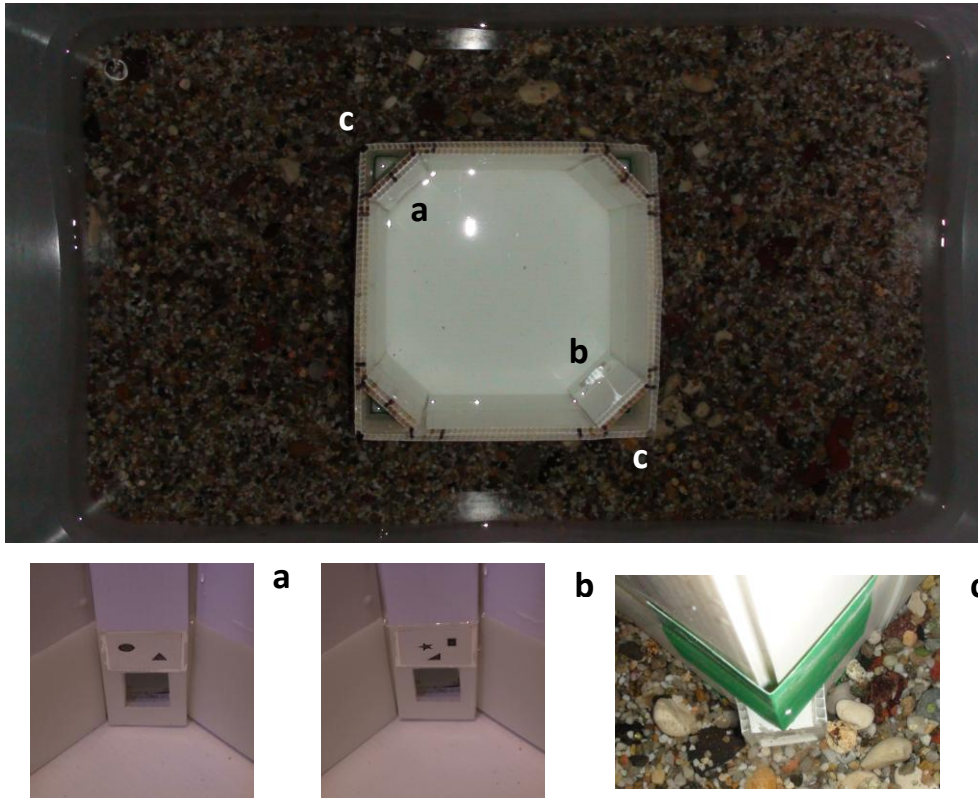


Fig. 29: *Apparato sperimentale utilizzato per l’addestramento dei pesci. I soggetti venivano inseriti in un ambiente cubico dove potevano avere due potenziali vie d’uscita (a, b). Solo l’uscita associata alla numerosità corretta permetteva al pesce di uscire attraverso un corridoio (c) e congiungersi ai compagni.*

Procedura sperimentale

Al fine di far acquisire confidenza con l’uso dei corridoi utilizzati nell’addestramento, cinque giorni prima dell’inizio di questo i soggetti venivano inseriti in una vasca (60 x 26 x 36 cm) che presentava al centro una parete di poliplack bianco che la divideva in due settori identici. Due porte simili a quelli dell’addestramento erano posti al centro della parete di poliplack, permettendo ai soggetti di passare da un settore all’altro della vasca. Entrambi i corridoi erano interamente attraversabili e nessuno stimolo era associato a questi. Trascorso questo periodo tutti i soggetti iniziavano l’addestramento.

Un terzo dei soggetti è stato sottoposto alla condizione “esclusivamente numerica”, un terzo alla condizione “solo variabili continue” e il restante terzo è stato osservato nella condizione “numeri + variabili continue”. Sono state effettuate 6 prove al giorno per 10 sessioni quotidiane, per un totale di 60 prove. In ognuna di queste prove il pesce veniva inizialmente inserito all’interno di un cilindro di ambientamento (6.5 cm di diametro) posto al centro del contenitore cubico, dove restava in ambientamento 10 secondi. Trascorso tale periodo, il soggetto veniva liberato e veniva registrato verso quale dei due possibili corridoi il pesce si indirizzava come prima scelta. Qualora il soggetto non effettuasse alcuna scelta entro il tempo massimo di osservazione (20 minuti), veniva trasportato nella vasca esterna per 5 minuti e successivamente re-introdotta nell’apparato cubico. Non appena il pesce riusciva ad uscire, si poteva riunire con tre conspecifici dello stesso sesso per un totale di 5 minuti, superato questo periodo iniziava un’altra prova. La posizione della porta rinforzata veniva modificata da una prova all’altra.

In ciascuna condizione, la metà dei soggetti è stata addestrata verso la quantità più grande e l’altra metà dei soggetti è stata addestrata verso la quantità più piccola. È stato considerato come compito appreso il caso in cui la frequenza di scelte corrette complessive verso la numerosità rinforzata è risultata statisticamente significativa al test del chi-quadro. Il tempo di apprendimento di ciascuna condizione, invece, è stato determinato considerando quante prove erano necessarie affinché il soggetto svolgesse il 75% di scelte corrette in due sessioni consecutive di addestramento.

Risultati

I dati delle tre condizioni sperimentali sono stati analizzati separatamente.

Condizione esclusivamente numerica

I risultati mostrano che non vi è nessuna differenza tra i pesci addestrati verso la numerosità maggiore (media \pm ds: 0.633 ± 0.083) e quelli addestrati verso la minore (0.728 ± 0.067 ; $t(4) = 1.527$, $p = 0.202$). Cinque soggetti su sei al termine dell’addestramento hanno appreso il compito (chi quadrato sulla frequenza di scelte corrette, $p < 0.050$). Complessivamente, la proporzione di

risposte corrette è statisticamente significativa (0.681 ± 0.085 , $t(5) = 5.188$, $p = 0.04$).

Condizione solo variabili continue

Non vi è alcuna differenza tra la proporzione di scelte corrette dei soggetti addestrati verso la numerosità maggiore (0.650 ± 0.050) e quelli addestrati verso il minore (0.644 ± 0.035 ; $t(4) = 0.158$, $p = 0.882$). Quattro soggetti su sei al termine dell'addestramento hanno dimostrato di aver appreso il compito ($p < 0.050$). Complessivamente, la proporzione di risposte corrette è statisticamente significativa (0.647 ± 0.389 , $t(5) = 9.340$, $p < 0.001$).

Condizione numeri + variabili continue

Non sono state trovate differenze tra i pesci addestrati verso la numerosità maggiore (0.689 ± 0.082) e quelli addestrati verso la numerosità minore (0.728 ± 0.069 ; $t(4) = 0.626$, $p = 0.565$). Tutti i soggetti al termine dell'addestramento hanno dimostrato di aver appreso la discriminazione ($p < 0.050$). Complessivamente, la proporzione di risposte corrette è statisticamente significativa (0.708 ± 0.071 , $t(5) = 7.157$, $p = 0.010$).

Precedenti studi in cui è stata utilizzata la stessa procedura sperimentale impiegata in questo esperimento hanno mostrato che nei pesci dopo circa 30 prove di addestramento, ovvero dal quinto giorno, l'accuratezza raggiunge un livello di plateau (Agrillo et al., 2009; Truppa et al., 2010). Da un'analisi visiva dei dati è emerso che questo pattern di risultati era presente anche in questo esperimento. I primi cinque giorni di addestramento sono stati quindi analizzati separatamente dagli ultimi cinque. Un'ANOVA univariata sulla proporzione delle scelte corrette nelle sessioni 1-5 ha mostrato una significativa differenza fra le tre condizioni ($F_{(2,17)} = 5.655$, $p = 0.015$). L'analisi post-hoc di Bonferroni ha evidenziato una differenza tra la condizione "numeri + variabili continue" e le altre due condizioni ("esclusivamente numerica": $p = 0.048$, "solo variabili continue": $p = 0.023$), mentre non è stata rilevata differenza alcuna tra queste ultime due ($p = 1$).

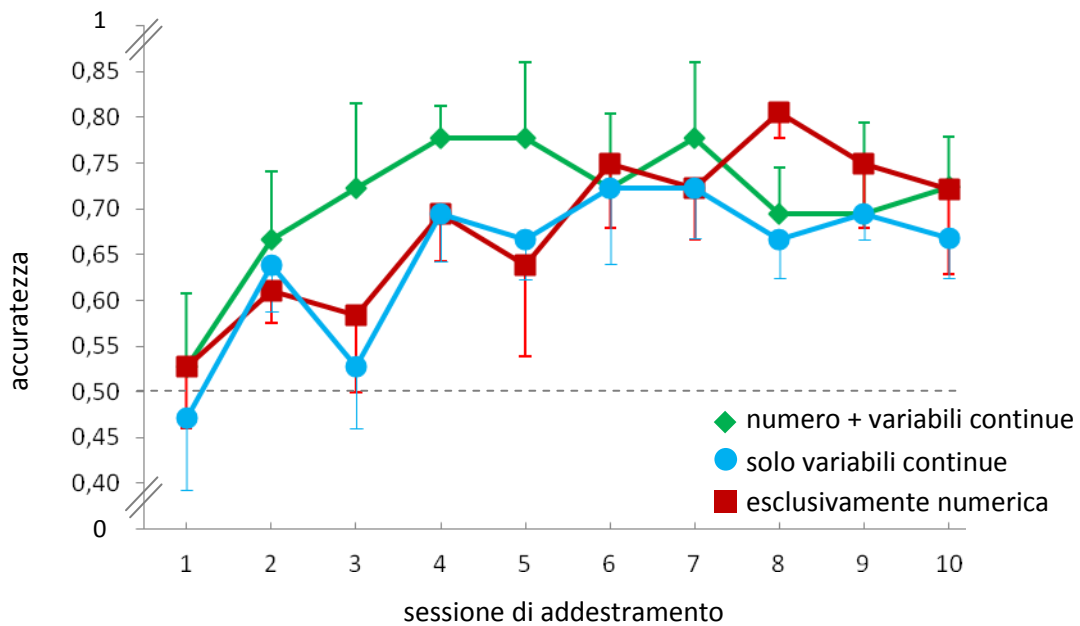


Fig. 30: *Proporzione di scelte corrette (accuratezza) durante le 10 sessioni di addestramento. I soggetti apprendono più velocemente nella condizione “numero + variabili continue”*

Risultati simili sono stati ottenuti considerando il numero di prove necessarie per raggiungere il criterio di apprendimento. I soggetti hanno appreso più velocemente nella condizione “numeri + variabili continue” (Kruskal–Wallis ANOVA, $k[2] = 8.099$, $p = 0.017$). Il Mann–Whitney U test ha evidenziato una differenza tra la condizione “numeri + variabili continue” (23 ± 7.0 prove) e le altre due condizioni (esclusivamente numerica: 42 ± 12.5 , $U = 3.000$, $p = 0.015$; solo variabili continue: $42. \pm 13.6$, $U = 3.000$, $p = 0.015$), mentre non è stata rilevata differenza alcuna tra queste ultime due ($U = 17.000$, $p = 0.869$).

5.2 Discussione

Uno studio precedente aveva dimostrato che i pesci addestrati a discriminare tra 2 e 3 elementi si affidano spontaneamente alle variabili continue e in particolare all'area complessiva e allo spazio occupato dall'insieme; allo stesso tempo però se gli viene preclusa la possibilità di basarsi su queste variabili sono in grado di apprendere la discriminazione anche solo sulla base dell'informazione numerica (Agrillo et al., 2009). Risultati simili sono stati spesso trovati anche in studi condotti sui bambini in età pre verbale e in diverse altre specie animali e sono stati interpretati come una prova a sostegno dell'ipotesi che l'elaborazione dell'informazione numerica sia cognitivamente più difficile rispetto all'elaborazione delle variabili continue (Feigenson et al., 2002; Kilian et al., 2003).

In questo esperimento si è osservato che i pesci apprendono una discriminazione con una velocità diversa a seconda che abbiano a disposizione solo l'informazione numerica, solo le variabili continue o entrambi i tipi di informazione. I soggetti che potevano basarsi contemporaneamente sul numero e sugli altri indicatori non numerici hanno appreso il compito più velocemente e sono stati più accurati rispetto ai soggetti appartenenti alle condizioni in cui solo un tipo di informazione era disponibile. Questo risultato sembra indicare che una combinazione di tipologie di informazioni possa essere la condizione più semplice per i pesci e ciò è in linea con un'ampia letteratura che dimostra come le informazioni ridondanti, siano esse nella stessa modalità sensoriale o in modalità diverse, facilitano l'apprendimento nei bambini e nei primati non umani (Lickliter et al., 2006; Neil et al., 2006; Suanda et al., 2008). Inoltre una combinazione di informazioni numeriche e non numeriche rappresenta la condizione più frequente in natura: ad esempio una maggior quantità di cibo normalmente occupa anche più spazio, oppure i gruppi di compagni più numerosi hanno anche un'area complessiva maggiore e impiegano più tempo per emettere un maggior numero di richiami sociali (Agrillo et al., 2008; Beran et al., 2008; McComb et al., 1994). Non sorprende quindi che diverse specie animali abbiano sviluppato meccanismi che includono informazioni multiple al fine di stimare le quantità e che la prestazione sia migliore quando ci si affida a più indicatori piuttosto che a uno

solo. Evidenze a favore dell'uso di molteplici tipi di informazioni sono state riportate negli scimpanzé e nei bambini in età pre verbale (Suanda et al., 2008; Tomonaga, 2008). Inoltre recentemente è stato dimostrato che anche i bambini di 8-9 anni sono più accurati quando devono discriminare tra stimoli congruenti, ovvero in cui sia l'area complessiva che il numero indicano la risposta corretta, piuttosto che tra stimoli neutrali (in cui solo l'area o solo il numero indicano la risposta corretta) o tra stimoli incongruenti (Iuculano et al., 2008). Anche i risultati provenienti dagli studi neurobiologici vanno nella stessa direzione: ad esempio è stato dimostrato che negli umani adulti e nei macachi rhesus si attivano le stesse aree cerebrali sia per l'elaborazione delle variabili continue che del numero (Cohen Kadosh et al., 2008; Tudusciuc & Nieder, 2007).

È interessante notare che nel presente esperimento non è stata trovata alcuna differenza tra il livello di apprendimento nella condizione “esclusivamente numero” e quella “solo variabili continue”: questo suggerisce che l'elaborazione dell'informazione numerica non sia cognitivamente più complessa di quelle delle informazioni non numeriche. Tuttavia negli stimoli controllati per le variabili continue solo lo spazio totale occupato dagli elementi e l'area complessiva erano pareggiati: si potrebbe quindi ipotizzare che i pesci abbiano fatto affidamento su altre variabili, come la chiarezza totale, il perimetro totale e la densità, che però sono risultate irrilevanti in uno studio precedente condotto con la stessa procedura di addestramento e gli stessi stimoli (Agrillo et al., 2009).

I risultati qui riportati apparentemente possono sembrare in contraddizione con i dati che mostrano come molte specie animali, tra cui anche *Gambusia holbrooki*, utilizzano l'informazione numerica solo quando tutti gli altri indicatori di numerosità sono controllati (Agrillo et al., 2009; Breukelaar & Dalrymple-Alford, 1998; Kilian et al., 2003). Ci sono due possibili spiegazioni per questi risultati. La prima sottolinea che molti di questi studi hanno confrontato la condizione in cui gli animali avevano a disposizione sia il numero che le variabili continue con quella in cui solo il numero era disponibile (Krusch et al., 2010; Pisa & Agrillo, 2009). Questo tipo di disegno sperimentale confronta però animali che possono affidarsi al numero e ad almeno un altro indicatore di numerosità con animali che invece si possono basare su un'unica informazione (il numero).

Questo confronto è analogo a quello che nel presente esperimento si potrebbe fare tra la condizione “esclusivamente numero” e la condizione “numero + variabili continue”, e che infatti mostra una differenza significativa. La seconda spiegazione origina dal fatto che la dimensione numerica è una sola mentre vi sono molte altre dimensioni che correlano con il numero che possono essere usate come indicatori di numerosità. Vi è quindi una maggiore probabilità che la variabile più saliente per un determinato tipo di stimolo non sia numerica. Ad esempio, negli studi precedenti era stato dimostrato che i pesci quando hanno a disposizione sia il numero che le variabili continue si affidano spontaneamente alle informazioni non numeriche, come lo spazio totale occupato e l’area complessiva. Un’analisi dei dati più approfondita ha mostrato che i soggetti che si basavano sullo spazio totale non erano influenzati dall’area complessiva e viceversa, suggerendo così che ogni soggetto avesse una preferenza per un tipo di variabile, probabilmente quella che a lui appariva più saliente (Agrillo et al., 2009).

Riassumendo, i diversi lavori condotti sui pesci mostrano che quando sono presenti sia le informazioni numeriche che quelle non numeriche quest’ultime sono quelle utilizzate spontaneamente per discriminare il gruppo più numeroso (Agrillo et al., 2007, 2008). I pesci possono però anche imparare a compiere discriminazioni affidandosi unicamente al numero (Agrillo et al., 2009). Inoltre quest’ultimo esperimento ha dimostrato che l’apprendimento è più semplice e più veloce quando i soggetti hanno a disposizione una combinazione di diversi tipi di informazione, mentre non vi è alcuna differenza tra la condizione in cui solo il numero è disponibile e quella in cui lo sono solo le variabili continue, suggerendo così che per i pesci l’elaborazione dell’informazione numerica non sia cognitivamente più difficile dell’elaborazione di altri tipi di variabili.

6. Il sistema dei grandi numeri

Gli esperimenti fin qui descritti portano ad ipotizzare l'esistenza nei pesci di due sistemi numerici indipendenti per l'elaborazione di numerosità inferiori a 4 e numerosità oltre questo limite. Per quanto riguarda le piccole numerosità, come descritto in precedenza, una recente ricerca ha documentato che *Gambusia holbrooki* è in grado di apprendere una discriminazione tra piccole quantità di forme astratte affidandosi all'informazione numerica (Agrillo et al., 2009). Non vi sono tuttavia evidenze di simili capacità numeriche nella distinzione di grandi quantità. I seguenti esperimenti hanno quindi indagato quali variabili vengano utilizzate nell'apprendere una discriminazione fra grandi quantità (4 vs. 8) e quali siano le caratteristiche del sistema dei grandi numeri.

Nel primo test si è verificato quali variabili vengono utilizzate spontaneamente dai pesci nella discriminazione di grandi quantità quando sia l'informazione numerica che le variabili continue sono potenzialmente disponibili. Nel successivo test i pesci sono stati addestrati a distinguere tra 4 e 8 oggetti mentre sono state simultaneamente controllate le variabili continue, al fine di verificare se i pesci possano distinguere anche tra grandi quantità utilizzando unicamente informazioni di natura numerica. In seguito sono state valutate l'influenza della numerosità totale e quella del rapporto numerico sulla prestazione dei soggetti. Infine in un ultimo esperimento le caratteristiche del sistema dei grandi numeri dei pesci sono state confrontate con quelle degli esseri umani adulti, sottoponendo un campione di studenti universitari ad un test in cui venivano presentati gli stessi stimoli utilizzati negli esperimenti con i pesci.

6.1. Esperimento 9: Le variabili continue nell'apprendimento di discriminazioni tra grandi numerosità

Allo scopo di indagare quale indicatore di numerosità venga utilizzato spontaneamente dai pesci durante l'apprendimento di una discriminazione tra grandi numeri, i soggetti hanno inizialmente appreso a discriminare tra 4 e 8 elementi in una condizione in cui tutte le variabili continue erano disponibili;

successivamente i soggetti sono stati sottoposti a test controllando una variabile alla volta (l'area complessiva, lo spazio totale, la densità e la chiarezza), al fine di verificare quale di queste era stata utilizzata nel processo di apprendimento.

Soggetti

Un totale di 10 femmine adulte di *Gambusia holbrooki* sono state utilizzate in questo test. I soggetti sono stati mantenuti nelle stesse condizioni descritte per gli esperimenti precedenti.

Procedura sperimentale

L'apparato e la procedura di questo esperimento erano simili a quelli utilizzati in una precedente ricerca che indagava la discriminazione di piccole numerosità in *Gambusia holbrooki* (Agrillo et al., 2009). L'esperimento è stato suddiviso in tre fasi: pre-addestramento, addestramento e test di controllo.

Pre-addestramento

Al fine di migliorare le possibilità di apprendimento, è stato introdotto un pre-addestramento della durata di una settimana in cui i pesci potevano iniziare a familiarizzare con le numerosità incontrate successivamente durante l'addestramento. L'apparato di pre-addestramento era costituito da una vasca di 68 x 68 x 38 cm divisa in quattro settori identici da pareti di poliplack bianco (Fig. 31). Ciascun settore comunicava con quello adiacente attraverso una coppia di piccoli corridoi di 2.5 x 3.5 x 1 cm posti a 12.5 cm di altezza rispetto al fondo della vasca, distanziati di 8 cm e separati da una parete di poliplack lunga 7 cm; sopra i corridoi venivano presentati gli stimoli all'interno di un quadrato bianco di 3 x 3 cm. Solo il corridoio associato con la numerosità rinforzata permetteva ai soggetti di passare da un settore all'altro della vasca; quello associato allo stimolo non rinforzato, al contrario, permetteva di vedere al di là ma non era possibile attraversarlo. Ai lati della vasca erano presenti quattro neon (18 W) ed un sistema di filtraggio per l'acqua; quest'ultima era mantenuta alla temperatura costante di 25 ± 2 °C.

Gli stimoli utilizzati consistevano in gruppi di forme geometriche di diversa numerosità. Ogni coppia presentava uno stimolo formato da 4 elementi e

uno formato da 8. Non è stato effettuato nessun controllo per le variabili continue, di conseguenza era possibile distinguere tra le due quantità facendo affidamento sia all'informazione numerica che a quella non numerica. Un totale di 8 coppie di stimoli erano presenti contemporaneamente nella vasca, 2 coppie in ogni parete. Ogni giorno tutte le coppie di stimoli venivano sostituite con altre coppie non ancora presentate ai soggetti: nel complesso 56 differenti coppie di stimoli sono state presentate in questo apparato.

Tre femmine adulte venivano inserite contemporaneamente nell'apparato di pre-addestramento. Qui i soggetti venivano lasciati liberi di esplorare l'ambiente per una settimana. Al termine del settimo giorno tutti i pesci iniziavano la fase di addestramento.



Fig. 31: L'apparato usato nel pre-addestramento era costituito da una vasca suddivisa in quattro scompartimenti identici. Per passare da un settore all'altro i soggetti disponevano di piccoli corridoi sopra i quali venivano presentate insieme di forme geometriche di diversa numerosità.

Addestramento

L'apparato utilizzato per l'addestramento era il medesimo descritto nell'esperimento 8.

Gli stimoli erano costituiti da gruppi di 4 e 8 elementi. Sono state utilizzate 60 nuove coppie di stimoli, con le medesime caratteristiche di quelle utilizzate nella fase di pre-addestramento. Metà dei soggetti sono stati addestrati verso la numerosità maggiore, e l'altra metà verso la numerosità minore.

Per verificare se i pesci avessero imparato il compito a partire dal terzo giorno le loro prestazioni sono state analizzate mediante il test del chi-quadro. Se la frequenza di scelte corrette risultava statisticamente significativa il soggetto iniziava il giorno seguente la successiva fase dell'esperimento (il test di controllo).

Test di controllo

Nel test di controllo sono stati utilizzati cinque differenti set di stimoli. In dettaglio è stata controllata una variabile continua alla volta, ovvero: l'area complessiva degli elementi, la densità degli elementi, lo spazio totale occupato dagli elementi e la chiarezza totale degli stimoli (Fig. 32). Il quinto set consisteva in una serie di coppie in cui non veniva attuato alcun controllo per variabili non numeriche (e fungeva da set di controllo). Tutti gli stimoli sono stati creati utilizzando Microsoft Office 2007 e l'area, lo spazio, la densità e la chiarezza sono stati controllati utilizzando il software TpsDig.

Ciascuna prova di questa fase avveniva in estinzione: i pesci non potevano realmente raggiungere i compagni in quanto entrambe le porte erano state bloccate. In questo modo è stato possibile verificare che cosa avessero imparato in precedenza senza fornir loro ulteriori rinforzi nella fase critica del test. Al fine di evitare l'estinzione della risposta sono state inserite all'interno di ogni sessione giornaliera due prove di recupero, in cui i pesci potevano realmente raggiungere i compagni una volta selezionata la quantità corretta. Tali prove di recupero, comunque, non sono state considerate nelle analisi dei dati.

Questa fase è durata 6 giorni, 6 prove al giorno, per un totale di 36 prove complessive.

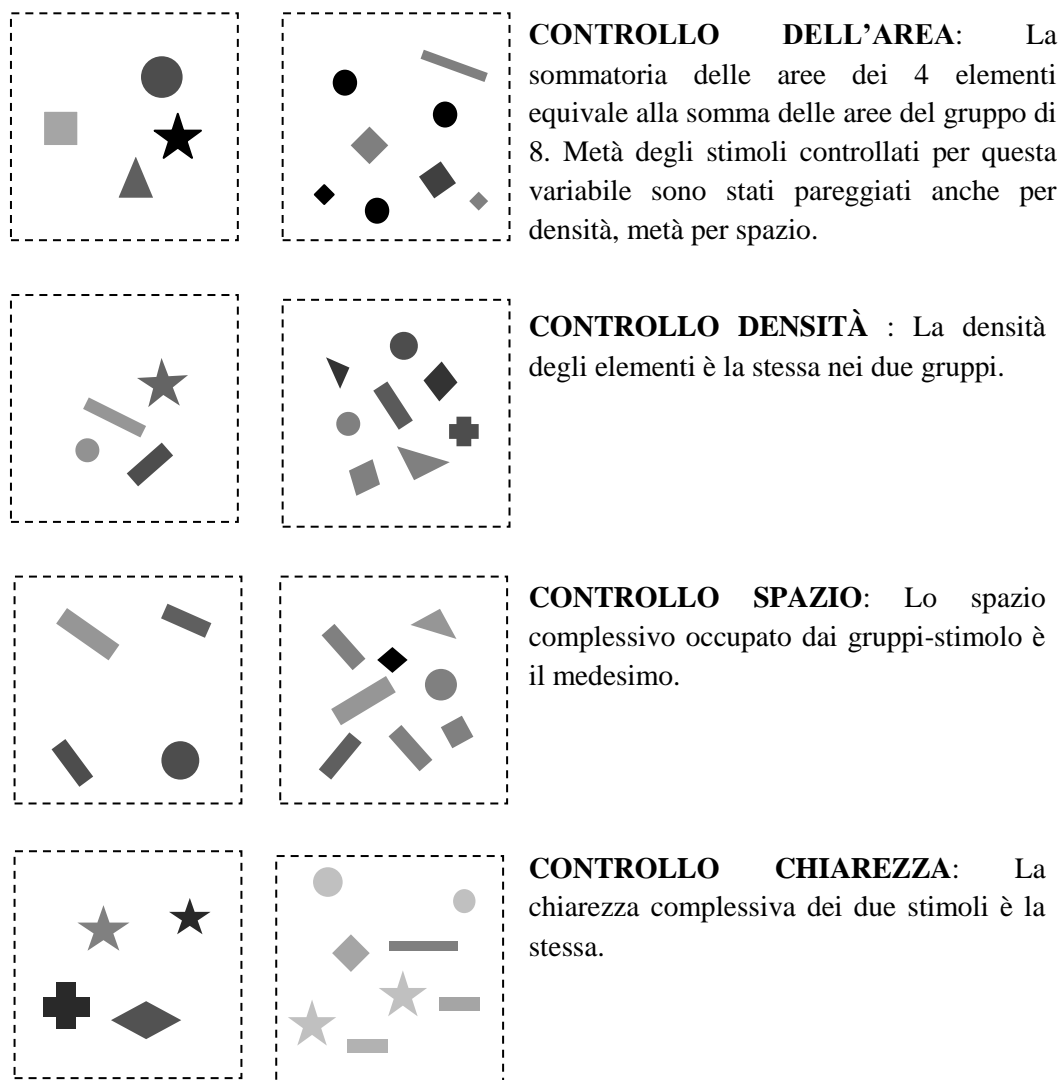


Fig. 32: Una rappresentazione schematica dei diversi set utilizzati nel test di controllo

Risultati

Tutti i dieci soggetti hanno appreso il compito nella fase di addestramento ($p < 0.050$). Non è stata evidenziata alcuna differenza significativa nella proporzione delle scelte corrette tra pesci addestrati verso 8 elementi (0.753 ± 0.556) e quelli addestrati verso 4 (0.796 ± 0.071 ; $t(8) = -1.063$, $p = 0.319$).

Per quanto riguarda il test di controllo, i soggetti hanno discriminato con successo tra le due quantità quando ogni variabile era disponibile ($t(9) = 7.965$, $p < 0.001$), e nei set in cui sono stati controllati singolarmente la chiarezza totale ($t(9) = 6.091$, $p < 0.001$), la densità ($t(9) = 6.128$, $p < 0.001$) e lo spazio totale

occupato dagli stimoli ($t(9) = 3.000$, $p = 0.015$). Al contrario, nessuna scelta significativa è emersa quando è stata controllata l'area complessiva ($t(9) = 0.165$, $p = 0.872$), indicando così i soggetti si erano affidati a questa variabile durante l'addestramento (Fig. 33).

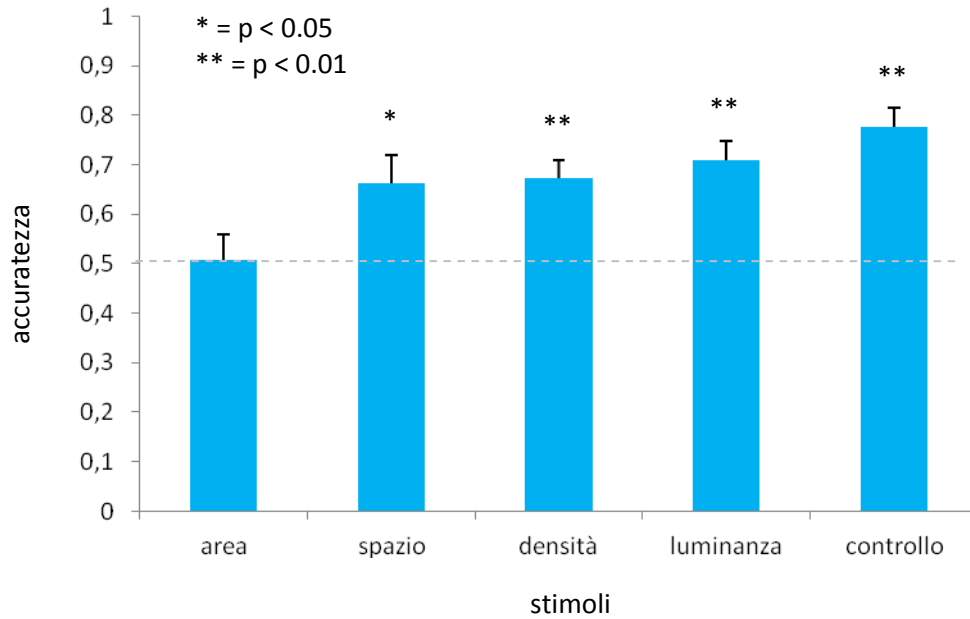


Fig. 33: L'accuratezza nelle condizioni in cui l'area complessiva, lo spazio totale occupato, la densità, la chiarezza erano controllate, e nella condizione in cui non vi era alcun controllo delle variabili continue.

6.2 Esperimento 10: Il numero nell'apprendimento di discriminazioni tra grandi numerosità

Nel complesso i risultati dell'Esperimento 9 dimostrano che i pesci si affidano all'area complessiva degli elementi per distinguere tra grandi quantità, mentre non utilizzano lo spazio totale occupato dagli stimoli, la densità o la chiarezza totale degli stimoli. In questo esperimento i pesci sono stati addestrati a distinguere tra 4 e 8 controllando simultaneamente le variabili continue, al fine di determinare se i pesci possano discriminare tra grandi quantità utilizzando unicamente l'informazione numerica.

Soggetti

Un totale di 11 femmine adulte di *Gambusia holbrooki* sono state sottoposte a test. Prima degli esperimenti i soggetti erano mantenuti in condizioni analoghe a quelle descritte negli esperimenti precedenti.

Procedura sperimentale

In questo esperimento sono stati utilizzati i medesimi apparati sperimentali descritti nel precedente esperimento. Anche la procedura è simile a quella descritta precedentemente e prevedeva una fase di pre-addestramento, una di addestramento e un test di controllo. In tutte le fasi il confronto presentato era 4 vs. 8. Sei soggetti sono stati addestrati verso la numerosità maggiore e 5 verso la minore.

Pre-addestramento

L'apparato sperimentale è lo stesso utilizzato nell'esperimento precedente. Sono state presentate coppie di stimoli nelle quali l'area complessiva e la chiarezza totale erano pareggiate. Inoltre, in metà delle coppie è stata controllata anche la densità media, mentre nell'altra metà è stato controllato lo spazio totale.

Addestramento

Durante questa fase è stato possibile valutare se i pesci possano apprendere una discriminazione fra grandi numeri anche quando l'area complessiva, la chiarezza, la densità e lo spazio occupato dagli elementi sono pareggiati contemporaneamente. L'addestramento consisteva in un totale di 36 prove (6

prove al giorno per un totale di 6 giorni). Come in precedenza, è stato verificato se la proporzione di scelte verso la numerosità rinforzata fosse statisticamente significativa al test del chi-quadro.

Test di controllo

Al termine dell'addestramento è stato necessario un test di controllo. Infatti pareggiando l'area di un gruppo di 4 e uno di 8 elementi si può fornire un ulteriore indicatore di natura non numerica per distinguere i due insiemi: la dimensione media degli elementi. Inevitabilmente un gruppo di 4 elementi la cui area complessiva è uguale a quella di un gruppo di 8 è composto da forme geometriche mediamente più grandi, per cui i soggetti potrebbero imparare il compito non tanto sulla base della numerosità degli insiemi, quanto invece evitando o scegliendo il gruppo composto dalle forme più grandi. Quindi, dopo aver raggiunto il criterio, è stata aggiunta una fase di controllo in estinzione nella quale tutte le coppie di stimoli erano composte da elementi identici in grandezza e forma. Un totale di 24 prove (6 al giorno, per 4 giorni) è stata effettuata per questo test. Come nell'esperimento 9, sono state inserite due prove rinforzate all'interno di ogni sessione giornaliera al fine di evitare l'estinzione della risposta.

Risultati

Non è stata riscontrata alcuna differenza nella proporzione di scelte corrette tra pesci addestrati verso gli 8 elementi (0.671 ± 0.089) e quelli addestrati verso i 4 (0.683 ± 0.025 ; $t(9) = 0.292$, $p = 0.777$). Dieci pesci su 11 hanno dimostrato di aver imparato il compito al termine delle sessioni di addestramento (chi-quadro, $p < 0.050$). Nel complesso, la scelta verso la numerosità rinforzata è risultata statisticamente significativa (0.677 ± 0.065 ; $t(10) = 9.037$, $p < 0.001$).

Un soggetto è stato escluso dal successivo test di controllo a causa di un cattivo stato di salute e quindi 9 soggetti hanno iniziato il test di controllo in cui venivano presentati stimoli formati da figure identiche. I risultati del test di controllo hanno mostrato che i pesci hanno selezionato ancora la numerosità verso cui erano stati rinforzati, dimostrando di aver fatto affidamento durante l'addestramento alla componente numerica piuttosto che alla grandezza media

degli elementi che componevano i due gruppi (0.616 ± 0.112 ; $t(8) = 3.107$, $p = 0.015$).

6.3 Esperimento 11: Il limite superiore del sistema dei grandi numeri

Lo scopo di questo esperimento era quello di indagare se il sistema per l'elaborazione dei grandi numeri sia influenzato dalla numerosità totale da discriminare e se sia caratterizzato da un limite superiore. In questo esperimento i pesci sono stati inizialmente addestrati a distinguere due insiemi di figure geometriche bidimensionali il cui rapporto numerico era costante (0.5) e la cui somma totale era simile (4 vs. 8, 5 vs. 10 e 6 vs. 12). Nella successiva fase test ai soggetti venivano presentati dei nuovi confronti con rapporto numerico costante ma in cui la numerosità assoluta era molto diversa (4 vs. 8, 15 vs. 30 e 100 vs. 200); è stata quindi confrontata l'accuratezza dei soggetti nei diversi confronti, in modo tale da valutare se la numerosità totale influenzi o meno la capacità di discriminare tra grandi quantità.

Soggetti

Un totale di 6 femmine adulte di *Gambusia holbrooki* sono state sottoposte a test. Prima dell'esperimento i pesci erano mantenuti nelle stesse condizioni descritte per gli esperimenti precedenti.

Apparato e procedura sperimentale

Gli apparati sperimentali utilizzati erano gli stessi descritti per gli esperimenti precedenti. Tre soggetti sono stati addestrati verso la numerosità maggiore e tre verso la minore. La procedura sperimentale era suddivisa in quattro fasi.

Pre-addestramento

Durante la fase di pre-addestramento venivano presentati tre confronti numerici (4 vs. 8, 5 vs. 10 e 6 vs. 12) caratterizzati dallo stesso rapporto numerico (0.50). Tutte le coppie di stimoli erano controllati per le variabili continue e i diversi confronti numerici erano presentati con una sequenza random.

Addestramento

L'addestramento consisteva in 18 prove suddivise in 3 giorni e in cui venivano utilizzati gli stessi confronti numerici del pre-addestramento.

Test

Nella fase di test sono stati inseriti due nuovi confronti numerici (15 vs. 30 e 100 vs. 200) che venivano presentati su pannelli più grandi (5 x 5 cm invece che 3 x 3 cm). Inoltre, come controllo, è stato utilizzato anche il confronto 4 vs. 8. Tutti e tre i confronti avevano un rapporto di 0.50, mentre la numerosità totale era molto diversa. Anche in questo caso gli stimoli erano controllati per le variabili continue. La fase test durava 10 giorni (6 prove per ciascun giorno, per un totale di 60 prove) e sono state presentate 20 prove per ciascun confronto numerico. La fase critica dell'esperimento consisteva nel paragonare la prestazione dei soggetti nei tre confronti numerici, allo scopo di verificare se la capacità di apprendere discriminazioni fra grandi numerosità fosse influenzata dalla numerosità totale.

Test di controllo

Anche in questo caso la conseguenza di aver controllato le variabili continue degli stimoli è quella di aver fornito ai soggetti un ulteriore possibile indicatore non numerico, ovvero la dimensione media degli elementi. Per questo, come nell'esperimento precedente, è stato necessario introdurre un test di controllo in estinzione. In questo test è stato presentato il confronto 100 vs. 200 in cui gli stimoli erano formati da elementi tutti uguali fra loro allo scopo di valutare se i pesci avessero fatto affidamento alla dimensione media degli elementi durante l'addestramento. In questa fase sono state presentate 24 prove (6 al giorno, per 4 giorni).

Risultati

Per quanto riguarda la fase di addestramento non è stata evidenziata alcuna differenza significativa nella proporzione delle scelte corrette tra pesci addestrati verso la numerosità maggiore (media \pm ds: 0.685 ± 0.032) e quelli addestrati verso quella minore (0.667 ± 0.056 ; $t(4) = 0.50$, $p = 0.643$). Nell'insieme la preferenza per lo stimolo rinforzato è risultata statisticamente significativa (0.676 ± 0.041 , $t(5) = 10.30$, $p < 0.001$).

Allo stesso modo anche nella fase test non è stata trovata alcuna differenza tra i pesci addestrati verso il minore e quelli addestrati verso il maggiore (rispettivamente: 0.639 ± 0.054 e 0.600 ± 0.033 ; $t(4) = 1.07$, $p = 0.346$). I soggetti

hanno appreso la discriminazione in tutti e tre i confronti numerici (4 vs. 8: $t(5) = 4.04$, $p = 0.010$; 15 vs. 30: $t(5) = 3.32$, $p = 0.021$; 100 vs. 200: $t(5) = 7.75$, $p = 0.001$), e non è stata evidenziata alcuna differenza tra di essi ($F_{(2,10)} = 3.35$, $p = 0.712$) (Fig. 34). Inoltre hanno discriminato correttamente tra 100 e 200 anche quando gli stimoli erano formati da elementi uguali fra loro (0.625 ± 0.053 , $t(5) = 5.81$, $p = 0.002$).

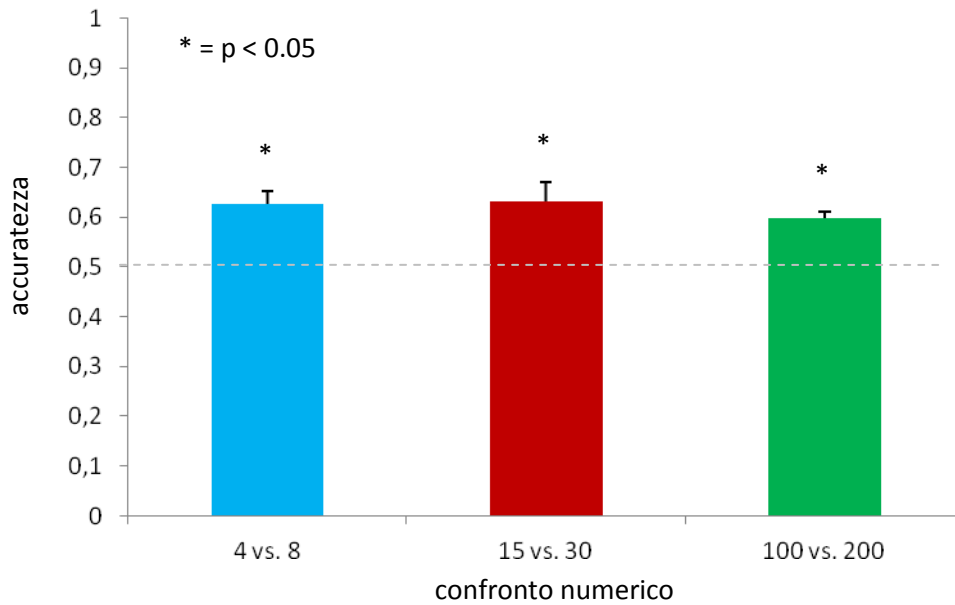


Fig. 34: *L'accuratezza nell'apprendimento di discriminazioni fra grandi numeri non è influenzata dalla numerosità totale.*

6.4 Esperimento 12: Il rapporto numerico nel sistema dei grandi numeri

In questo esperimento è stato indagato il ruolo del rapporto numerico nell'apprendimento di discriminazioni tra grandi quantità. I pesci sono stati inizialmente addestrati a discriminare tra quantità con un rapporto di 0.5 mentre nella fase test sono stati presentati confronti in cui la numerosità totale era simile ma il rapporto numerico era differente (0.5; 0.67 e 0.75).

Soggetti

Un totale di 6 femmine adulte di *Gambusia holbrooki* sono state sottoposte a test. I pesci sono stati allevati e stabulati nelle stesse condizioni descritte per gli esperimenti precedenti.

Apparato e procedura sperimentale

Gli apparati utilizzati sono gli stessi descritti per l'esperimento precedente. Tre soggetti sono stati addestrati verso la quantità maggiore e 3 verso quella minore. Anche la procedura sperimentale era simile alla precedente e prevedeva tre fasi: pre-addestramento, addestramento e test. Durante la fase di pre-addestramento ai soggetti sono stati presentati due diversi confronti (5 vs. 10 e 6 vs. 12) con lo stesso rapporto numerico (0.5). Tutti gli stimoli erano controllati per le variabili continue e presentati in una sequenza random. Nella fase di addestramento, della durata di tre giorni, sono stati utilizzati gli stessi confronti numerici della fase precedente. Nella successiva fase test sono stati introdotti 3 nuovi confronti (7 vs. 14, 8 vs. 12 e 9 vs. 12) in cui il rapporto numerico era diverso (0.5; 0.67 e 0.75), mentre la numerosità totale era simile, infatti ciascuna coppia era formata da 20 o 21 elementi. Questa fase durava 14 giorni (6 prove al giorno), ogni giorno venivano presentate 2 prove per ciascun confronto numerico. La fase critica dell'esperimento era il paragone fra la prestazione dei soggetti nei tre confronti numerici, allo scopo di verificare se la capacità di apprendere discriminazioni fra grandi numerosità fosse influenzata dal rapporto numerico.

Risultati

Nella fase di addestramento non è stata evidenziata alcuna differenza significativa nella proporzione delle scelte corrette tra pesci addestrati verso la numerosità maggiore (media \pm ds: 0.592 ± 0.064) e quelli addestrati verso la minore (0.648 ± 0.085 , $t(4) = 2.091$, $p = 0.417$). Nell'insieme la preferenza per lo stimolo rinforzato è risultata statisticamente significativa (0.620 ± 0.073 , $t(5) = 3.99$, $p=0.010$). Anche nella fase test non è stata trovata alcuna differenza tra i pesci addestrati verso il minore e quelli addestrati verso il maggiore (rispettivamente: 0.595 ± 0.036 e 0.563 ± 0.014 , $t(4) = 1.44$, $p = 0.224$). Dall'analisi emerge invece che vi è una differenza nell'apprendimento dei tre diversi confronti numerici ($F_{(2,10)} = 5.75$, $p = 0.022$). I soggetti infatti apprendono le discriminazioni con un rapporto di 0.5 e 0.67 (rispettivamente: $t(5) = 8.73$, $p < 0.001$ e $t(5) = 2.71$, $p = 0.042$) ma non quella con rapporto 0.75 ($t(5) = 0.0$, $p = 1.0$) (Fig. 35).

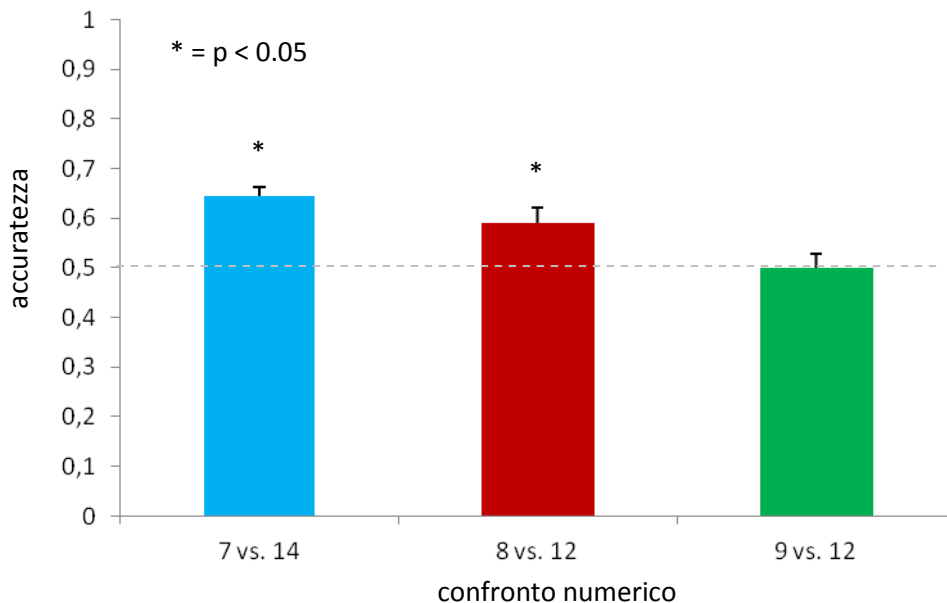


Fig. 35: L'accuratezza nell'apprendimento di discriminazioni fra grandi numeri è influenzata dal rapporto numerico.

6.5 Esperimento 13: Il sistema dei grandi numeri nell'uomo

Allo scopo di confrontare la capacità dei pesci di discriminare grandi quantità con quella dell'uomo, gli stessi stimoli utilizzati negli esperimenti 11 e 12 sono stati presentati ad un gruppo di studenti universitari ai quali veniva richiesto di stimare quale stimolo della coppia fosse il più numeroso. L'esperimento aveva lo scopo di valutare sia l'influenza della numerosità totale che quella del rapporto numerico nel sistema dei grandi numeri.

Partecipanti

Venticinque studenti universitari, di età compresa tra i 21 e i 26 anni (età media 22.9) hanno partecipato volontariamente all'esperimento. Sette partecipanti erano maschi, tutti avevano vista normale o corretta.

Stimoli e procedura

L'esperimento è stato condotto in un laboratorio del Dipartimento di Psicologia Generale dell'Università di Padova, in una stanza isolata e debolmente illuminata.

Sono state utilizzate coppie di stimoli formati da diverse forme geometriche di colore nero presentate su uno sfondo bianco. In metà delle coppie l'area complessiva, la chairezza, la densità e lo spazio totale occupato dagli stimoli erano pareggiate (erano quindi gli stessi stimoli utilizzati negli esperimenti 11 e 12), mentre nell'altra metà queste variabili non erano controllate.

Sono stati presentati tre confronti numerici che differivano per la numerosità totale (4 vs. 8, 15 vs. 30 e 100 vs. 200) e tre confronti in cui il rapporto numerico era diverso (7 vs. 14, 8 vs. 12 e 9 vs. 12). L'esperimento consisteva nella presentazione di 80 coppie di stimoli, in un unico blocco sperimentale.

La procedura sperimentale è la stessa impiegata nell'esperimento 1. Sullo schermo appariva il primo stimolo per 150 ms e dopo un intervallo di 500 ms appariva il secondo. Il compito dei partecipanti era quello di indicare il più velocemente e il più accuratamente possibile quale tra i due stimoli fosse il più numeroso. Sono stati registrati sia l'accuratezza che i tempi di risposta.

Risultati

Numerosità totale

Per quanto riguarda il ruolo della numerosità totale, i dati sull'accuratezza sono stati analizzati con un'ANOVA a misure ripetute 3 x 2, in cui i fattori entro i soggetti erano la numerosità totale (4 vs. 8/ 15 vs. 30/ 100 vs. 200) e le variabili continue (controllate/ non controllate). Non è emerso alcun effetto dei fattori principali (numerosità totale: $F_{(2,48)} = 2.29$, $p = 0.113$; variabili continue: $F_{(1,48)} = 2.09$, $p = 0.161$), mentre l'interazione tra i due fattori è statisticamente significativa ($F_{(2,48)} = 5.10$, $p = 0.010$). Infatti quando le variabili continue sono controllate i partecipanti tendono ad essere meno accurati all'aumentare del numero di elementi presentati.

Analizzando separatamente le prove in cui le variabili continue erano controllate e quelle in cui non lo erano, il fattore numerosità totale non risulta statisticamente significativo nelle prove non controllate ($F_{(2,48)} = 2.06$, $p = 0.139$), mentre vi è un peggioramento significativo della prestazione all'aumentare del numero totale di elementi quando i partecipanti hanno a disposizione unicamente l'informazione numerica ($F_{(2,48)} = 4.81$, $p = 0.012$). Quest'effetto è dovuto ad una differenza significativa tra la prestazione nel confronto 15 vs. 30 e quella in 100 vs. 200 (Bonferroni post hoc test: $p = 0.014$).

Dall'analisi sui tempi di risposta né i fattori principali (numerosità totale: $F_{(2,48)} = 0.75$, $p = 0.479$; variabili continue: $F_{(1,48)} = 2.22$, $p = 0.149$) né l'interazione sono risultati statisticamente significativi ($F_{(2,48)} = 1.60$, $p = 0.212$).

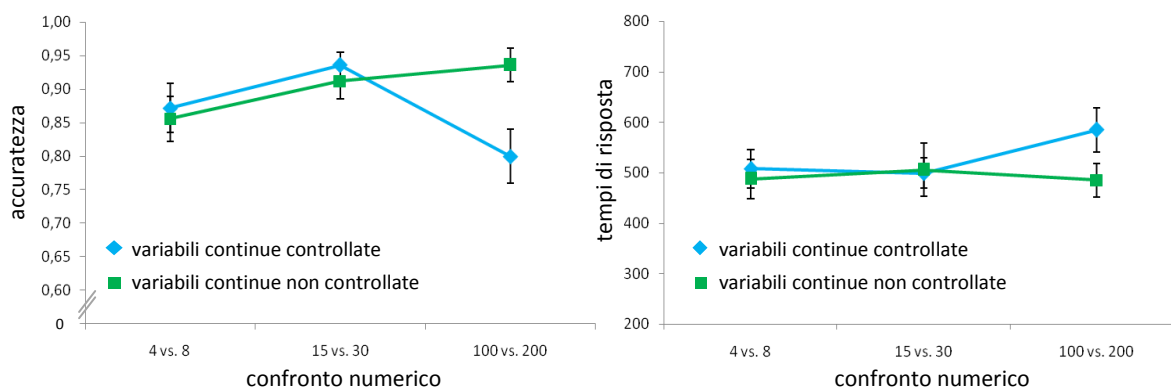


Fig. 36: Sia l'accuratezza che i tempi di risposta non sono influenzati dalla numerosità totale

Rapporto numerico

Per quanto riguarda l'influenza del rapporto numerico i dati sull'accuratezza sono stati analizzati attraverso un'ANOVA 3 x 2 in cui i fattori entro i soggetti erano il rapporto numerico (0.50/ 0.67 e 0.75) e le variabili continue (controllate/ non controllate). È emerso un effetto principale del fattore rapporto numerico ($F_{(2,48)} = 4.37, p = 0.018$), infatti i partecipanti commettono più errori all'aumentare del rapporto. Il controllo delle variabili continue e l'interazione tra i due fattori non sono risultati statisticamente significativi (rispettivamente: $F_{(1,48)} = 1.86, p = 0.185$; $F_{(2,48)} = 0.80, p = 0.455$).

La stessa analisi è stata condotta sui tempi di risposta ed ha evidenziato un effetto significativo sia del fattore rapporto numerico ($F_{(2,48)} = 20.050, p < 0.001$) che del fattore variabili continue ($F_{(1,48)} = 15.56, p < 0.001$). Quest'ultimo effetto è dovuto all'aumento dei tempi di risposta nelle prove in cui gli stimoli erano controllati per le variabili continue. L'interazione tra i due fattori non è risultata statisticamente significativa ($F_{(2,48)} = 1.53, p = 0.227$) (Fig. 37).

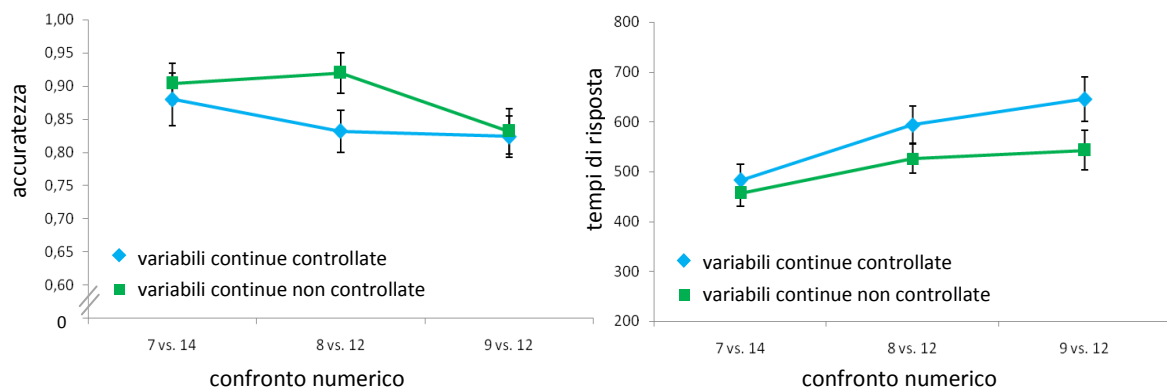


Fig. 37: Sia l'accuratezza che i tempi di risposta sono influenzati dal rapporto numerico

6.6. *Discussione*

Precedenti studi hanno dimostrato che esemplari adulti di *Gambusia holbrooki* possono essere addestrati a discriminare tra stimoli astratti formati da piccole quantità di elementi, come ad esempio 2 vs. 3 (Agrillo et al., 2009). I risultati degli esperimenti qui presentati mostrano che i pesci possono apprendere discriminazioni anche tra quantità che superano il range dei piccoli numeri e possono farlo anche quando hanno a disposizione unicamente l'informazione numerica. Come per gli esseri umani, la prestazione dei pesci migliora al diminuire del rapporto numerico tra le numerosità confrontate, e non è influenzata dalla numerosità totale, infatti i pesci si sono mostrati in grado di discriminare gruppi che contenevano anche centinaia di elementi.

Le variabili continue

Allo scopo di valutare quale tipo di informazione venga utilizzata spontaneamente dai pesci nell'apprendere una discriminazione tra grandi quantità i soggetti sono stati addestrati a discriminare tra due stimoli in cui le variabili continue non erano controllate e dopo aver raggiunto il criterio di apprendimento sono stati sottoposti ad un test in estinzione in cui le variabili continue venivano controllate una alla volta. La prestazione dei soggetti è scesa a livello del caso solo nella condizione in cui gli stimoli erano pareggiati per l'area complessiva, indicando così che questa era la variabile a cui si erano affidati durante l'apprendimento. Precedenti studi hanno messo in luce che l'area complessiva degli elementi gioca un ruolo importante nella discriminazione di quantità anche negli esseri umani (Feigenson et al., 2002; Durgin, 1995) e in altre specie di mammiferi (Kilian et al., 2003; Pisa & Agrillo, 2009). Inoltre i test condotti con la procedura della scelta spontanea hanno dimostrato che i pesci si basano su questo indicatore per discriminare il gruppo più numeroso (Agrillo et al., 2008). Per quanto riguarda invece gli esperimenti condotti con la procedura di addestramento, questi hanno evidenziato che l'area complessiva viene utilizzata spontaneamente dai pesci anche nelle discriminazioni tra piccole numerosità (Agrillo et al., 2009). Vi è comunque un'importante differenza fra i risultati ottenuti nei test di apprendimento di discriminazioni tra piccoli numeri e quelli tra

grandi numeri, infatti nel primo caso i pesci si affidano anche allo spazio totale occupato dagli elementi. Questa variabile, invece, non influenza la prestazione dei soggetti nel confronto 4 vs. 8. Una differenza fra le variabili utilizzate per i confronti nei due diversi range numerici è stata trovata anche nei test di scelta spontanea, dai quali è emerso che la quantità di movimento influenza la scelta dei soggetti solo nei confronti fra grandi numeri, mentre viene ignorata nei confronti fra piccoli numeri (Agrillo et al., 2008). Ad oggi è possibile solo speculare sulla natura di queste differenze. È possibile interpretare questi dati come un'ulteriore conferma del fatto che i confronti appartenenti ai diversi range vengano elaborati da sistemi numerici indipendenti, che quindi hanno anche caratteristiche di funzionamento diverse (Hauser et al., 2003; Feigenson et al., 2002; Hauser et al., 2000). Tuttavia non si può escludere che questa differenza sia legata ad un aspetto metodologico: è più difficile non far correlare l'informazione numerica con quella non numerica nei confronti che coinvolgono pochi elementi rispetto a quando si confrontano grandi numerosità.

Il fatto che i pesci nell'apprendere discriminazioni di quantità si affidino spontaneamente alle variabili continue non significa necessariamente che non siano in grado di apprendere tale discriminazione basandosi solo sul numero. I risultati dell'esperimento 10 infatti mostrano che i soggetti possono apprendere una discriminazione tra grandi numeri anche quando le variabili continue sono controllate. La capacità di discriminare grandi numerosità in base all'informazione numerica è stata documentata sia nei bambini in età pre verbale che in altri mammiferi non umani, e recentemente è stata riscontrata anche negli uccelli. Ad esempio i pettirossi della Nuova Zelanda sono in grado di discriminare 4 vs. 8 utilizzando unicamente l'informazione numerica (Hunt et al., 2008) ed anche i pulcini di pollo domestico riescono a elaborare correttamente delle somme che coinvolgono più di quattro elementi senza fare affidamento alle informazioni non numeriche (Rugani et al, 2009). Con il presente esperimento la lista dei vertebrati in grado di discriminare grandi quantità basandosi sul numero viene quindi estesa ad una specie filogeneticamente molto distante dall'uomo.

La numerosità totale

Nell'esperimento 11 i pesci erano inizialmente addestrati a discriminare tra due quantità e in seguito nella fase test veniva richiesto di generalizzare la regola appresa a nuove numerosità. I risultati mostrano che i soggetti discriminano tutti e tre i confronti presentati e che la loro prestazione non decresce all'aumentare del numero degli elementi, anche se questi sono nell'ordine delle centinaia. Una potenziale variabile confondente in questo esperimento è che, come conseguenza dell'aver pareggiato gli stimoli per le variabili continue, lo stimolo meno numeroso è formato da elementi mediamente più grandi di quelli dello stimolo più numeroso, e quindi i pesci avrebbero potuto affidarsi a questo indicatore. Per questo è stato inserito un test di controllo in cui veniva presentato il confronto 100 vs. 200 ma in questo caso gli stimoli erano formati da elementi tutti uguali fra loro. I soggetti sono stati in grado di estendere la regola appresa anche a questi stimoli, escludendo così la possibilità che si fossero affidati alla dimensione media degli elementi per apprendere la discriminazione.

La capacità di generalizzare una regola appresa anche a numerosità più grandi è stata dimostrata anche in altre specie animali. Uno studio ad esempio ha riportato come scimmie addestrate ad apprendere una regola con numerosità comprese tra 1 e 9 siano in grado di estenderla a numerosità comprese tra 20 e 30 (Cantlon & Brannon, 2006). I dati del presente esperimento rappresentano però la prima evidenza in un animale della capacità di discriminare anche fra centinaia di elementi. Questi risultati supportano l'idea che il meccanismo che sottende all'elaborazione delle grandi numerosità non abbia un limite superiore, inoltre evidenziano che discriminare centinaia di elementi non è più difficile che compiere discriminazioni tra quantità più piccole. Per quanto riguarda gli esseri umani alcuni studi hanno dimostrato la capacità di discriminare fra quantità molto ampie (oltre i 300 elementi: Durgin, 1995; Hollingsworth et al., 1991), e uno studio ha mostrato che i tempi di risposta non sono influenzati dalla numerosità totale degli elementi quando questi sono presentati visivamente, mentre si allungano all'aumentare della numerosità totale quando gli stimoli sono presentati uditi (Barth et al., 2003). Tuttavia i confronti fra specie diverse e in particolare tra gli esseri umani e gli altri animali sono sempre molto difficili a

causa delle diverse procedure sperimentali e i diversi stimoli utilizzati. Per questo motivo è stato condotto un esperimento in cui gli stessi stimoli impiegati nei test sui pesci sono stati presentati ad un gruppo di studenti universitari, ai quali veniva richiesto di indicare quale tra i due stimoli fosse il più numeroso. Il pattern di risultati dei pesci è quasi sovrapponibile a quello ottenuto con gli studenti. La differenza principale tra le due specie è che quando gli stimoli sono controllati per le variabili continue (ovvero la condizione più simile all'esperimento condotto con i pesci) la prestazione degli studenti peggiora all'aumentare della numerosità totale, infatti vengono commessi più errori nel confronto 100 vs. 200 piuttosto che in 15 vs. 30, questo peggioramento invece non si rileva nella prestazione dei pesci. Ciò non significa necessariamente che vi sia una differenza tra i meccanismi responsabili della discriminazione tra grandi quantità nelle due specie. La differenza nei risultati infatti potrebbe essere dovuta al fatto che la misura della prestazione dei soggetti umani è più precisa e il campione degli studenti universitari più ampio rispetto a quello dei pesci. I dati sui pesci potrebbero quindi non avere una potenza statistica sufficiente per far emergere una differenza tra i confronti numerici presentati che invece è stata trovata negli esseri umani.

Il rapporto numerico

I risultati dell'esperimento 12 mostrano chiaramente che la capacità di discriminare grandi numerosità nei pesci è fortemente influenzata dal rapporto numerico, e questo va a confermare un'ampia letteratura che dimostra come la prestazione degli animali peggiori al diminuire della distanza numerica tra le quantità confrontate. La dipendenza dal rapporto numerico è stata riscontrata attraverso diversi paradigmi sperimentali (tempi di fissazione, procedure di scelta spontanea, procedure di addestramento), utilizzando diversi tipi di stimoli (pallini, conspecifici, cibo) e in diverse specie animali (Cantlon & Brannon, 2006; Ward & Smuts, 2007; Hauser et al., 2003; Barth et al., 2003; Flombaum, et al., 2005; Tomonaga & Matsuzawa, 2002, Izard et al., 2009). Per quanto riguarda i pesci un'influenza del rapporto numerico è stata trovata nei test di scelta spontanea in cui i soggetti devono discriminare tra due gruppi di conspecifici, ma in questo caso le variabili continue non erano controllate (Agrillo et al., 2008; Gómez-

Laplaza & Gerlai, 2011b). Per quanto riguarda gli esseri umani molti studi hanno evidenziato come la loro capacità di discriminare grandi numeri sia influenzata dal rapporto numerico (Halberda et al., 2008; Revkin et al., 2008; Cantlon & Brannon, 2007a). Tuttavia il confronto fra le specie è sempre reso difficile dall'utilizzo di procedure e di stimoli diversi. Presentando ad un campione di studenti universitari gli stessi stimoli utilizzati nell'esperimento con i pesci è emerso che, nonostante le ovvie differenze quantitative nella prestazione (gli esseri umani sono più accurati dei pesci), la prestazione ottenuta dalle due specie è pressoché sovrapponibile, infatti in entrambi i casi è influenzata dal rapporto numerico.

L'influenza del rapporto numerico è stata ampiamente indagata anche nei bambini in età pre verbale e numerosi studi hanno dimostrato come la capacità di discriminare tra due quantità diventi sempre più precisa con lo sviluppo. Bambini al secondo giorno di vita discriminano quantità che hanno un rapporto di 0.33, a 6 mesi di vita sono in grado di discriminare gruppi che hanno un rapporto numerico di 0.50, a 10 mesi un rapporto di 0.67, fino ad arrivare all'età adulta in cui è possibile discriminare rapporti di 0.875 (Barth et al., 2003; Xu & Arriga, 2007; Halberda & Feigenson, 2008) . In questo studio i pesci si sono dimostrati in grado di apprendere discriminazioni in cui il rapporto era di 0.50 e 0.67, mentre hanno fallito nel caso di 0.75. La loro prestazione è quindi paragonabile a quella di un bambino con un età compresa tra i 10 mesi e i 2-3 anni.

Nel complesso le caratteristiche della capacità nei pesci di discriminare grandi quantità che sono emerse da questa serie di esperimenti, ovvero la mancanza di un limite superiore nel numero totale di elementi che possono essere elaborati e l'influenza del rapporto numerico, sembrano rientrare nel quadro teorico del sistema dell'analog magnitude.

3. Conclusioni generali

La presente ricerca ha indagato le capacità numeriche nei pesci, in particolare nei modelli sperimentali *Poecilia reticulata* e *Gambusia holbrooki*. Inoltre allo scopo di valutare se i sistemi numerici dei pesci siano simili a quelli dell'uomo, in alcuni esperimenti la prestazione dei pesci è stata confrontata con quella di soggetti umani adulti sottoposti a compiti di discriminazione numerica.

In primo luogo sono stati condotti dei test per studiare quali sistemi cognitivi sottostiano alle capacità numeriche. I dati provenienti da esperimenti condotti con diverse procedure, test di scelta spontanea e addestramenti, e su soggetti di diversa età sono concordi nel suggerire l'esistenza nei pesci di due sistemi indipendenti per la rappresentazione di piccole e di grandi quantità, come ipotizzato per la specie umana. Gli esperimenti sull'ontogenesi, in particolare, hanno dimostrato che la capacità di discriminare quantità inferiori a 4 è innata e presente alla nascita, mentre quella di discriminare grandi quantità emerge più tardi come risultato della maturazione e dell'esperienza sociale. Questa dissociazione temporale suggerisce che i pesci possano avere due sistemi indipendenti per la rappresentazione di quantità appartenenti ai due diversi range. Per quanto riguarda i pesci adulti, sia gli esperimenti condotti con la procedura della scelta spontanea sia quelli condotti con la tecnica dell'addestramento hanno evidenziato come la capacità di discriminare quantità maggiori di 4 sia fortemente influenzata dal rapporto numerico, mentre le discriminazioni tra piccole quantità non lo siano, in quanto discriminare 1 vs. 4 sarebbe facile quanto discriminare 3 vs. 4. I sistemi numerici dei pesci sembrano quindi avere caratteristiche molto simili a quelli degli esseri umani: la prestazione peggiora all'aumentare del rapporto numerico nei confronti fra grandi numeri mentre rimane stabile nei confronti fra piccoli numeri.

Nonostante questi dati abbiano permesso di comprendere molti aspetti dei sistemi numerici pre verbali, ad oggi il reale funzionamento dei sistemi numerici non è ancora del tutto chiaro e in particolare quali siano i limiti precisi dei range entro cui i due sistemi opererebbero. Infatti nelle diverse specie animali è stato individuato un limite diverso per il sistema dei piccoli numeri. Ad esempio

soffermandosi sulle ricerche condotte sui pesci, è stato evidenziato che i pesci angelo non sono in grado di discriminare 3 vs. 4 e quindi in questa specie il limite del sistema object-file sembra essere di 3 unità (Gómez-Laplaza & Gerlai 2011a). Lo stesso limite è stato trovato anche in *Poecilia latipinna* (Bradner & McRobert, 2001) e in *Girardinus falcatus* (Agrillo & Dadda, 2007). Invece un limite di 4 unità è stato trovato in *Poecilia reticulata* in questo studio, e in studi precedenti in *Gambusia holbrooki* e in *Salaria Pavo* (Agrillo et al. 2008; Hennig, 1977). Una possibile spiegazione di questi dati è che le diverse specie siano state sottoposte a differenti pressioni selettive dovute ai contesti in cui queste si sono sviluppate (ad esempio un diversa densità di predatori). Un'altra possibilità è che la differenza sia dovuta alle diverse metodologie utilizzate nelle ricerche. Un lavoro precedente infatti ha dimostrato che il limite nella capacità di compiere discriminazioni fini è influenzato dal tipo di procedura utilizzata: esemplari di *Girardinus falcatus* sono stati in grado di discriminare 2 vs. 3 solo in una delle due procedure utilizzate in questo studio (Agrillo & Dadda, 2007). Nel caso in cui invece due diverse specie, *Poecilia reticulata* e *Gambusia holobrooki*, sono state sottoposte a test impiegando la stessa procedura e lo stesso apparato sperimentale la loro prestazione è risultata del tutto paragonabile, non solo per quanto riguarda il limite del sistema object-file ma anche per quanto riguarda i confronti nel range dei grandi numeri. Questo rafforza l'idea che le differenze trovate tra le specie potrebbero essere dovute alle differenti procedure utilizzate. Emerge quindi la necessità, per il futuro, di individuare una procedura che possa essere utilizzata tra le diverse specie. In questo modo sarà possibile un confronto diretto tra le prestazioni e sarà quindi possibile comprendere più a fondo il funzionamento dei sistemi numerici pre verbali e la loro origine evolutiva.

Nonostante alcune differenze tra le specie, i dati qui riportati e la precedente letteratura nel complesso sembrano sostenere l'idea che i piccoli e i grandi numeri vengano rappresentati attraverso sistemi numerici indipendenti, e che questi sistemi siano gli stessi che sono presenti anche nell'uomo.

Similitudini tra pesci e esseri umani sono state riscontrate anche per quanto riguarda il ruolo delle variabili continue. Negli studi qui presentati è stato dimostrato che per i pesci apprendere una discriminazione sulla base

dell'informazione numerica non è più difficile che apprenderla affidandosi alle variabili continue. Questo risultato è in linea con quelli ottenuti in precedenza con le scimmie (Cantlon & Brannon, 2007b) e con i bambini in età pre verbale (Cordes & Brannon, 2008a), ma è di particolare rilevanza perché dimostra che anche per una specie distante dall'uomo il numero è una dimensione primaria degli stimoli così come lo sono altre caratteristiche (area, volume, etc.). Questi risultati sono quindi contrari all'ipotesi di una discontinuità tra gli esseri umani e le altre specie animali, sottolineando invece le somiglianze tra i sistemi che elaborano le quantità continue e discrete nei pesci e quelli nell'uomo.

Potrebbe sorprendere che le abilità numeriche dei pesci siano per molti aspetti così simili a quelle degli esseri umani: per comprendere questa somiglianza è necessario prendere in considerazione alcuni aspetti. Innanzitutto è importante sottolineare che le abilità cognitive dei pesci e la complessità di alcuni dei loro comportamenti in passato sono state ampiamente sottovalutate. Negli ultimi anni nei pesci sono stati descritti alcuni comportamenti che tradizionalmente erano ritenuti una prerogativa di mammiferi e uccelli. Ad esempio i pesci sono in grado di riconoscere fino a 40 individui familiari, cooperano per raggiungere un obiettivo comune, sono in grado di ricordare interazioni cooperative passate e di prendere decisioni in base a queste, copiano il comportamento di altri compagni, apprendono nuove strategie di foraggiamento e anti predatorie da compagni più esperti, sfruttano le informazioni che ricavano dall'osservazione di interazioni aggressive o di accoppiamento di altri individui (Bshary et al., 2002; Brown & Laland, 2003; Bisazza, 2010). In secondo luogo, l'analisi dei circuiti neurali in specie con un sistema nervoso semplice, come gli insetti, ha dimostrato che è sufficiente un numero molto ristretto di neuroni per supportare alcune funzioni cognitive come la capacità di compiere stime numeriche (Chittka & Niven, 2009). Dati nella stessa direzione provengono anche da un recente studio che utilizzando reti neurali artificiali ha dimostrato che sono necessarie meno di 25 unità per ottenere una prestazione in compiti di discriminazione numerica paragonabile a quella ottenuta da esseri viventi come gli anfibi o i pesci (Hope et al., 2010).

In conclusione, considerando questi risultati nel loro complesso non si può escludere la possibilità che le similitudini nelle capacità numeriche dei pesci e dei primati siano semplicemente dovute ad una coincidenza o al fatto che simili pressioni selettive abbiano portato all'evoluzione di capacità simili in diverse specie. Nonostante questo, le numerose somiglianze tra le capacità numeriche dei primati e quelle dei pesci, che sono state descritte nei presenti esperimenti e in altri studi, rendono ancora più probabile l'ipotesi che le sofisticate abilità numeriche degli esseri umani adulti originino da sistemi numerici evolutivamente molto antichi e che esseri umani e pesci potrebbero aver ereditato questi sistemi da un antenato comune più di 450 milioni di anni fa.

4. Bibliografia

- Agrillo, C., Dadda, M., & Bisazza, A. (2007). Quantity discrimination in female mosquitofish. *Animal Cognition*, *10*(1), 63–70.
- Agrillo, C., Dadda, M., Serena, G., & Bisazza, A. (2008). Do fish count? Spontaneous discrimination of quantity in female mosquitofish. *Animal Cognition*, *11*(3), 495–503.
- Agrillo, C., Dadda, M., Serena, G., & Bisazza, A. (2009). Use of number by fish. *PLoS One*, *4*(3), e4786. doi:10.1371/journal.pone.0004786.
- Al Ain, S., Giret, N., Grand, M., Kreutzer, M., & Bovet, D. (2009). The discrimination of discrete and continuous amounts in African grey parrots (*Psittacus erithacus*). *Animal Cognition*, *12*, 145–154.
- Antell, S. E. & Keating, D. P. (1983). Perception of numerical invariance in neonates. *Child Development*, *54*, 695–701.
- Balakrishnan, J. D., & Ashby, F. G. (1991). Is subitizing a unique numerical ability? *Perception & Psychophysics*, *50*, 555-564.
- Barth, H., Kanwisher, N., & Spelke, E. S. (2003). The construction of large number representations in adults. *Cognition*, *86*, 201–221.
- Beran, M. J. (2004). Chimpanzees (*Pan troglodytes*) respond to nonvisible sets after one-by-one addition and removal of items. *Journal of Comparative Psychology*, *118*, 25–36.
- Beran, M. J. (2007). Rhesus monkeys (*Macaca mulatta*) enumerate large and small sequentially presented sets of items using analog numerical representations. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, *33*, 42–54.
- Beran, M. J., & Beran, M. M. (2004). Chimpanzees remember the results of one-by-one addition of food items to sets over extended time periods. *Psychological Science*, *15*, 94–99.
- Beran, M. J., Evans, T. A., Leighty, K. A., Harris, E. H., & Rice, D. (2008). Summation and quantity judgments of sequentially presented sets by capuchin monkeys (*Cebus apella*). *American Journal of Primatology*, *70*, 191–194.
- Bijeljic-Babic, R., Bertoni, J., & Mehler, J. (1991). How do four-day-old infants categorize multisyllabic utterances. *Developmental Psychology*, *29*, 711–721.
- Bisazza, A., & Marin, G. (1995). Sexual selection and sexual size dimorphism in the eastern mosquitofish *Gambusia holbrooki* (Pisces: Poeciliidae). *Ethology, Ecology and Evolution*, *7*, 169-183.

- Bisazza, A. (2010). Cognition. In: Evans, J., Pilastro, A., & Schlupp, I. (Eds) *Ecology and evolution of poeciliid fishes*. Chicago IL, USA: Chicago University Press
- Bonanni, R., Natoli, E., Cafazzo, S., & Valsecchi, P. (2010). Free-ranging dogs assess the quantity of opponents in intergroup conflicts. *Animal Cognition*, *14*(1), 103-115.
- Braaten, R. F. (1988). Protocounting as a last resort. *Behavioral and Brain Sciences*, *11*(4), 581.
- Bradner, J., & McRobert, S. P. (2001). The effect of shoal size on patterns of body colour segregation in mollies. *Journal of Fish Biology*, *59*(4), 960–967.
- Brannon, E. M., & Terrace, H. S. (1998). Ordering of the numerosities 1 to 9 by monkeys. *Science*, *282*, 746-749.
- Brannon, E. M., Jordan, K. E., & Jones, S. M. (2010). Behavioral signatures of numerical cognition. In Platt, M. L. and Ghazanfar, A. A. (Eds.) *Primate neuroethology* (pp: 144-159) Oxford, UK: Oxford University Press.
- Breukelaar, J. W. C., & Dalrymple-Alford, J. C. (1998). Timing ability and numerical competence in rats. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Process*, *24*, 84–97.
- Brown, C., & Laland, K. N. (2003). Social learning in fishes: a review. *Fish and Fisheries*, *4*, 280-288.
- Bshary, R., Wickler, W., & Fricke, H. (2002). Fish cognition: a primate's eye view. *Animal Cognition*, *5*, 1–13.
- Buckingham, J. N., Wong, B. B. M., & Rosenthal, G. G. (2007). Shoaling decisions in female swordtails: how do fish gauge group size?, *Behaviour*, *144*, 1333–1346.
- Call, J., & Tomasello, M. (2008). Does the chimpanzee have a theory of mind? 30 years later. *Trends in Cognitive Sciences*, *12*, 187–192.
- Cantlon, J., & Brannon, E. M. (2006). Shared system for ordering small and large numbers in monkeys and humans. *Psychological Science*, *17*(5), 401–406.
- Cantlon, J. F., & Brannon, E. M. (2007a). Basic math in monkeys and college students. *Plos Biology*, *5*, 2912–2919.
- Cantlon, J. F., & Brannon, E. M. (2007b). How much does number matter to a monkey (*Macaca mulatta*)? *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, *33*(1), 32–41.

- Carey, S. (1998). Knowledge of Number: Its Evolution and Ontogeny. *Science*, 282(5389), 641-642.
- Chervinski, J. (1984). Salinity tolerance of the guppy, *Poecilia reticulata* Peters. *Journal of Fish Biology*, 24, 449-452.
- Chesney, D. L., & Haladjian, H. H. (2011). Evidence for a shared mechanism used in multiple-object tracking and subitizing. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 73, 2457–2480.
- Chi, M. T. H., & Klahr, D. (1975). Span and rate of apprehension in children and adults. *Journal of Experimental Child Psychology*, 19(3), 434-439.
- Chittka, L., & Niven, J. (2009). Are bigger brains better? *Current Biology*, 19, R995–R1008.
- Clayton, N. S., & Dickinson, A. (1998). Episodic-like memory during cache recovery by scrub jays. *Nature*, 395, 272-274.
- Clearfield, M. W., & Mix, K. S. (1999). Number versus contour length in infants' discrimination of small visual sets. *Psychological Science*, 10(5), 408 – 411.
- Clearfield, M. W., & Mix, K. S. (2001). Infant use continuous quantity – not number – to discriminate small visual sets. *Journal of Cognition and Development*, 2(3), 243–260.
- Cohen Kadosh, R., Cohen Kadosh, K., & Henik, A. (2008). When brightness counts: The neuronal correlate of numerical-luminance interference. *Cerebral Cortex*, 18, 337–343.
- Cordes, S., & Brannon, E. M. (2008a). The difficulties of representing continuous extent in infancy: Using number is just easier. *Child Development*, 79(2), 476–489.
- Cordes, S., & Brannon, E. M. (2008b). Quantitative competencies in infancy. *Developmental Science*, 11, 803-808.
- Cordes, S., & Brannon, E. M. (2009). Crossing the divide: infants discriminate small from large numerosities. *Developmental Psychology*, 45, 1583–1594.
- Croft, D. P., James, R., Thomas, P. O . R., Hathaway, C., Mawdsley, D., Laland, K. L., & Krause, J. (2006). Social structure and co-operative interactions in a wild population of guppies (*Poecilia reticulata*). *Behavioural Ecology and Sociobiology*, 59, 644-650.
- Dacke, M., & Srinivasan, M. V. (2008). Evidence for counting in insects. *Animal Cognition*, 8, 159-165.

- Davis, H. P., & Memmott, J. (1982). Counting behavior in animals: A critical evaluation. *Psychological Bulletin*, *92*, 547–571.
- Davis, H. P., & Pérusse, R. (1988). Numerical competence in animals: definitional issues, current evidence, and a new research agenda. *Behavioral and Brain Sciences*, *11*, 561-615.
- Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, *44*, 1-42.
- Dehaene, S., Izard, V., Spelke, E., & Pica, P. (2008). Log or linear? Distinct intuitions of the number scale in Western and Amazonian indigenous cultures. *Science*, *320*, 1217-1220.
- Dulzetto, F. (1928). Osservazioni sulla vita sessuale di *Gambusia holbrooki*. *Atti della Repubblica Accademica dei Lincei*, *8*, 46-101.
- Durgin, F. H. (1995). Texture density adaptation and the perceived numerosity and distribution of texture. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *21*, 149 – 169.
- Emmerton, J., & Renner, J. C. (2009). Local rather than global processing of visual arrays in numerosity discrimination by pigeons (*Columbia livia*). *Animal Cognition*, *12*, 511–526.
- Fagan, J. F. (1977). Infant recognition memory: Studies in forgetting. *Child development*, *48*, 68–78.
- Feigenson, L. & Carey, S. (2003). Tracking individuals via object-files: Evidence from infants' manual search. *Developmental Science*, *6*, 568-584.
- Feigenson, L., & Carey, S. (2005). On the limits of infants' quantification of small object arrays. *Cognition*, *97*, 295-313.
- Feigenson, L., Carey, S., & Hauser, M. D. (2002). The representations underlying infants' choice of more: Object-files versus analog magnitudes. *Psychological Science*, *13*, 150–156.
- Feigenson, L., Dehaene, S., & Spelke, E. S. (2004). Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences*, *8*, 307-314.
- Flombaum, J. I., Junge, J. A., & Hauser, M. D. (2005). Rhesus monkeys (*Macaca mulatta*) spontaneously compute addition operations over large numbers. *Cognition*, *97*, 315–325.
- Gallistel, C. R., & Gelman, R. (1992). Preverbal and verbal counting and computation. *Cognition*, *44*, 43-74.

Gallistel, C. R., & Gelman, R. (2000). Non-verbal numerical cognition: from reals to integers. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(2), 59-65.

Glover, S., & Dixon, P. (2004). Likelihood ratios: A simple and flexible statistic for empirical psychologists. *Psychonomic Bulletin & Review*, 11, 791-806.

Gómez-Laplaza, L. M., & Gerlai, R. (2011a). Spontaneous discrimination of small quantities: shoaling preferences in angelfish (*Pterophyllum scalare*). *Animal Cognition*, 14, 565-574.

Gómez-Laplaza, L. M., & Gerlai, R. (2011b). Can angelfish (*Pterophyllum scalare*) count? Discrimination between different shoal sizes follows Weber's law. *Animal Cognition*, 14(1), 1-9.

Gross, H. J., Pahl, M., Si, A., Zhu, H., Tautz, J., & Zhang, S. (2009). Number based visual generalisation in the honeybee. *PLoS One*, 4(1), e4263. doi:10.1371/journal.pone.0004263.

Hager, M. C., & Helfman, G. S. (1991). Safety in numbers: Shoal size choice by minnows under predatory threat. *Behavioral Ecology*, 29, 271-276.

Halberda, J., & Feigenson, L. (2008). Developmental change in the acuity of the "Number sense": The approximate number system in 3-, 4-, 5-, and 6-year-olds and adults. *Developmental Psychology*, 44, 1457-1465.

Halberda, J., Mazocco, M. M. M., & Feigenson, L. (2008). Individual differences in nonverbal number acuity correlate with maths achievement. *Nature*, 455, 665-668.

Hanus, D., & Call, J. (2007). Discrete quantity judgments in the great apes (*Pan paniscus*, *Pan troglodytes*, *Gorilla gorilla*, *Pongo pygmaeus*). *Journal of Comparative Psychology*, 121(3), 241-249.

Haun, D. B. M., Jordan, F. M., Vallortigara, G., & Clayton, N. S. (2010). Origins of spatial, temporal and numerical cognition: Insights from comparative psychology. *Trends in Cognitive Sciences*, 14(12), 552-560.

Hauser, M. D., & Carey, S. (1998). Building a cognitive creature from a set of primitives: Evolutionary and developmental insights. The evolution of mind. In Dellarosa, D. & Colin, A. (Eds) *The evolution of mind*, (pp. 51-106) New York, NY, US: Oxford University PressCummins.

Hauser, M. D., & Carey, S. (2003). Spontaneous representations of small numbers of objects by rhesus macaques: Examinations of content and format. *Cognitive Psychology*, 47, 367-401.

- Hauser, M. D., Carey, S. & Hauser, L. B. (2000). Spontaneous number representation in semifree-ranging rhesus monkeys. *Proceedings of the Royal Society of London B*, 267, 829-833.
- Hauser, M. D., Tsao, F., Garcia, P., & Spelke, E. S. (2003). Evolutionary foundations of number: Spontaneous representation of numerical magnitudes by cotton-top tamarins. *Proceedings of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences*, 270, 1441-1446.
- Hennig, M. (1977). Counting ability in *Blennius-pavo* Risso (Blenniidae, Perciformes). *Zoologische Anzeiger*, 199, 1-18.
- Hodges, H. (1996). Maze procedures: the radial-arm and water maze compared. *Cognitive Brain Research*, 3, 167-181.
- Hollingsworth, W. H., Simmons, J. P., Coates, T. R., & Cross, H. A. (1991). Perceived numerosity as a function of array number, speed of array development, and density of array items. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 29, 448-450.
- Hope, T., Stoianov, I., & Zorzi, M. (2010). Through neural stimulation to behavior manipulation: A novel method for analyzing dynamical cognitive models. *Cognitive Science*, 34, 406-433.
- Hoysak, D. J., & Godin, J. G. J. (2007). Repeatability of male mate choice in the mosquitofish, *Gambusia holbrooki*. *Ethology*, 113, 1007-1018.
- Hunt, S., Low, J., & Burns, C. K. (2008). Adaptive numerical competency in a food-hoarding songbird. *Proceedings of the Royal Society of London B*, 10, 1098-1103.
- Hurewitz, F., Gelman, R., & Schnitzer, B. (2006). Sometimes area counts more than number. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103, 19599-19604.
- Hyde, D. C., & Spelke, E. S. (2009). All numbers are not equal: an electrophysiological investigation of small and large number representations. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 21, 1039-1053.
- Irie-Sugimoto, N., Kobayashi, T., & Sato, T. (2009). Relative quantity judgment by Asian elephants (*Elephas maximus*). *Animal Cognition*, 12(1), 193-199.
- Iuculano, T., Tang, J., Hall, C. W. B., & Butterworth, B. (2008). Core information processing deficits in developmental dyscalculia and low numeracy. *Developmental Science*, 11, 669-680.
- Izard, V., Sann, C., Spelke, E. S, & Streri, A. (2009). Newborn infants perceive abstract numbers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106, 10382-10385.

- Jevons, W.S. (1871). The power of numerical discrimination. *Nature*, 3(67), 281-282.
- Jordes, K. E., & Brannon, E. M. (2006). The multisensory representation of number in infancy. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 103(9), 3486-3489.
- Kaufman, E. L., Lord, M. W., Reese, T. W., & Volkman, J. (1949). The discrimination of visual number. *American Journal of Psychology*, 62(4), 498-525.
- Keppel, G. (1991). *Design and analysis: A researcher's handbook*. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- Kilian, A., Yaman, S., Fersen, L., & Güntürkün, O. (2003). A bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) discriminates visual stimuli differing in numerosity. *Learning & Behavior*, 31, 133-142.
- Krusche, P., Uller, C., & Dicke, U. (2010). Quantity discrimination in salamanders. *The Journal of Experimental Biology*, 213, 1822-1828.
- Leslie, A. M., Xu, F., Tremoulet, P. D., & Scholl, B. J. (1998). Indexing and the object concept: developing “what” and “where” systems. *Trends in Cognitive Sciences*, 2(1), 10-18.
- Lickliter, R., Bahrick, L. E., & Markham, R. G. (2006). Intersensory redundancy educates selective attention in bobwhite quail embryos. *Developmental Science*, 9, 604-615.
- Lipton, J. S., & Spelke, E. S. (2003). Origins of number sense: Large-number discrimination in human infants. *Psychological Science*, 14: 396-401.
- Lyon, B. E. (2003). Egg recognition and counting reduce costs of avian conspecific brood parasitism. *Nature*, 422, 495-499.
- Mandler, G., & Shebo, B. J. (1982). Subitizing: An analysis of its component processes. *Journal of Experimental Psychology: General*, 111(1), 1-22.
- McComb, K., Packer, C. & Pusey, A. (1994). Roaring and numerical assessment in contests between groups of female lions, *Panthera leo*. *Animal Behavior*, 47, 379-387.
- Meck, W. H., & Church, R. M. (1983). A mode control model of counting and timing processes. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 9, 320-334.

- Neil, P. A., Chee-Ruiter, C., Scheier, C., Lewkowicz, D. J., & Shimojo, S. (2006). Development of multisensory spatial integration and perception in humans. *Developmental Science*, *9*, 454–464.
- Nys, J., & Content, A. (2011). Judgement of discrete and continuous quantity in adults: Number counts! *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, doi:10.1080/17470218.2011.619661.
- Odell, N. S., & Eadie, J. M. (2010). Do wood ducks use the quantity of eggs in a nest as a cue to the nest's value? *Behavioral Ecology*, *21*, 794–801.
- Parr, L. A., & de Waal, F. B. M. (1999). Visual kin recognition in chimpanzees. *Nature*, *399*, 647-648.
- Pepperberg, I. M. (2006). Grey Parrot (*Psittacus erithacus*) numerical abilities: addition and further experiments on a zero-like concept. *Journal of Comparative Psychology*, *120*, 1-11.
- Pica, P., Lemer, C., Izard, V., & Dehaene, S. (2004). Exact and approximate arithmetic in Amazonian indigene group. *Science*, *306*, 499-503.
- Pisa, P. E., & Agrillo, C. (2009). Quantity discrimination in felines: A preliminary investigation of the domestic cat (*Felis silvestris catus*). *Journal of Ethology*, *27*(2), 289–293.
- Pokorny, J. J., & de Waal, F. B. M. (2009). Monkeys recognize the faces of group mates in photographs. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, *106*, 21539-21543.
- Povinelli, D. J., & Vonk, J. (2003). Chimpanzee minds: Suspiciously human? *Trends in Cognitive Sciences*, *7*, 157–160.
- Pritchard, V. L., Lawrence, J., Butlin, R. K., & Krause, J. (2001). Shoal choice in zebrafish, *Danio rerio*: the influence of shoal size and activity. *Animal Behaviour*, *62*, 1085-1088.
- Revkin, S. K., Piazza, M., Izard, V., Cohen, L., & Dehaene, S. (2008). Does subitizing reflect numerical estimation? *Psychological Science*, *19*, 607–614.
- Reznikova, Z., & Ryabko, B. (2011). Numerical competence in animals, with an insight from ants. *Behaviour*, *148*, 405-434.
- Ruusuvirta, T., Huottilainen, M., Fellman, V., & Näätänen, R. (2009). Numerical discrimination in newborn infants as revealed by event-related potentials to tone sequences. *European Journal of Neuroscience*, *30*, 1620–1624.

- Rugani, R., Regolin, L., & Vallortigara, G. (2008). Discrimination of small numerosities in young chicks. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, *34*(3), 388-399.
- Rugani, R., Fontanari, L., Simoni, E., Regolin, L., & Vallortigara, G. (2009). Arithmetic in newborn chicks. *Proceedings of the Royal Society B Biological Sciences*, *276*, 2451–2460.
- Saltzman, I. J., & Garner, W. R. (1948). Reaction Time as a Measure of Span of Attention. *The Journal of Psychology*, *25*(2), 227-241.
- Scholl, B. J., & Pylyshyn, Z. W. (1999). Tracking multiple items through occlusion: Clues to visual objecthood. *Cognitive Psychology*, *38*, 259–290.
- Seron, X., & Pesenti, M. (2001). The number sense theory needs more empirical evidence. *Mind and Language*, *16*(1), 76–88.
- Shettleworth, S. J. (1998). Cognition, evolution and behavior. Oxford University Press, New York: NY.
- Simon, T. J. (1997). Reconceptualizing the origins of number knowledge: A “non-numerical” account. *Cognitive Development*, *12*(3), 349-372.
- Simon, T. J., Cabrera, A., & Kliegl, R. (1993). A new approach to the study of subitizing as distinct enumeration processing. *Proceedings of the Fifteenth Annual Meeting of the Cognitive Science Society*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum
- Smith, C.C. (2007). Independent effects of male and female density on sexual harassment, female fitness, and male competition for mates in the western mosquitofish *Gambusia affinis*. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, *61*, 1349-1358.
- Sokal, R.R., & Rohlf, F.J. (1995). Biometry. New York: Freeman and Company
- Sovrano, V. A., Bisazza, A., & Vallortigara, G. (2002). Modularity and spatial reorientation in a simple mind: encoding of geometric and nongeometric properties of a spatial environment by fish. *Cognition*, *85*, B51–B59.
- Sovrano, V. A., Dadda, M., & Bisazza, A. (2005). Lateralized fish perform better than non lateralized fish in spatial reorientation tasks. *Behavioural Brain Research*, *163*, 122-127.
- Spelke, E. S., & Kinzler, K. D. (2007). Core knowledge. *Developmental Science*, *10*, 89-96.
- Spetch, M., & Friedman, A. (2006). Comparative cognition of object recognition. *Comparative Cognition & Behavior Reviews*, *1*, 12-35.

- Starkey, P., Spelke, E. S., & Gelman, R. (1983). Detection of intermodal numerical correspondences by human infants. *Science*, 222(4620), 179-181.
- Suanda, S. H., Thompson, W., & Brannon, E. M. (2008). Changes in the ability to detect ordinal numerical relationships between 9 and 11 months of age. *Infancy*, 13, 308–337.
- Tomonaga, M., & Matsuzawa, T. (2002). Enumeration of briefly presented items by the chimpanzee (*Pan troglodytes*) and humans (*Homo sapiens*). *Animal Learning & Behavior*, 30, 143-157.
- Tomonaga, M. (2008). Relative numerosity discrimination by chimpanzees (*Pan troglodytes*): Evidence for approximate numerical representations. *Animal Cognition*, 11, 43–57.
- Trick, L. M. , & Pylyshyn, Z. W. (1993). What enumeration studies can show us about spatial attention - Evidence for limited capacity preattentive processing. *Journal of Experimental Psychology-Human Perception and Performance*, 19, 331–351.
- Trick, L. M., & Pylyshyn, Z. W. (1994). Why are small and large number enumerated differently? A limited-capacity preattentive stage in vision. *Psychological Review*, 10(1), 1–23.
- Truppa, V., Sovrano, V. A., Spinozzi, G., & Bisazza, A. (2010). Processing of visual hierarchical stimuli by fish (*Xenotoca eiseni*). *Behavioural Brain Research*, 207(1), 51–60.
- Tudusciuc, O., & Nieder, A. (2007). Neuronal population coding of continuous and discrete quantity in the primate posterior parietal cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104, 14513–14518.
- Uller, C., Carey, S., Huntley-Fenner, G., & Klatt, L. (1999). What representations might underlie infant numerical knowledge? *Cognitive Development*, 14, 1–36.
- Uller, C., Jaeger, R., Guidry, G., & Martin C. (2003). Salamanders (*Plethodon cinereus*) go for more: rudiments of number in an amphibian. *Animal Cognition*, 6, 105-112.
- Van de Walle, G. A., Carey, S., & Prevor, M. (2000). Bases for object individuation in infancy: Evidence from manual search. *Journal of Cognition and Development*, 1(3), 249–280.
- vanMarle, K., & Wynn, K. (2009). Infants' auditory enumeration: Evidence for analog magnitudes in the small number range. *Cognition*, 111, 302–316.
- Vos, P. G., Van Oeffelen, M. P., Tibosch, H. J., & Allik, J. (1988). Area numerosity interactions. *Psychological Research*, 50, 148-150.

- Ward, C., & Smuts, B. B. (2007). Quantity-based judgments in the domestic dog (*Canis lupus familiaris*). *Animal Cognition*, *10*, 71–80.
- White, D. J., Ho, L., & Freed-Brown, G. (2009). Counting chicks before they hatch. Female cowbirds can time readiness of a nest for parasitism. *Psychological Science*, *20*(9), 1140-1145.
- Wilson, M. L., Britton, N. F., & Franks, N. R. (2002). Chimpazees and the mathematics of battle. *Proceeding of the Royal Society of London B*, *269*, 1107-1112.
- Wood, J. N., & Spelke, E. S. (2005). Chronometric studies of numerical cognition in five-month-old infants. *Cognition*, *97*, 23–39.
- Wood, J. N., Hauser, M. D., Glynn, D. D., & Barner, D. (2008). Free-ranging rhesus monkeys spontaneously individuate and enumerate small numbers of non-solid portions. *Cognition*, *106*(1), 207-221.
- Wynn, K. (1992). Addition and subtraction by human infants. *Nature*, *358*, 749-750.
- Wynn, K. (1995). Origins of numerical knowledge. *Mathematical cognition*, *1*(1), 35 – 60.
- Wynn, K. (1996). Infants' individuation and enumeration of actions. *Psychological Science*, *7*, 164-169.
- Xu, F. (2003). Numerosity discrimination in infants: Evidence for two systems of representations. *Cognition*, *89*(1), B15–B25.
- Xu, F., & Arriaga, R. I. (2007). Number discrimination in 10-month-old infants. *British Journal of Developmental Psychology*, *25*, 103–108.
- Xu, F., & Spelke, E. S. (2000). Large number discrimination in 6-month-old infants. *Cognition*, *74*, B1–B11.
- Xu, F., Spelke, E. S., & Goddard, S. (2005). Number sense in human infants. *Developmental Science*, *8*, 88–101.