



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Psicologia dello sviluppo e della socializzazione - DPSS

**Corso di laurea in Scienze Psicologiche dello Sviluppo, della Personalità e
Relazioni Interpersonali**

Elaborato finale

**LE PIANTE SANNO CONTARE? UNO STUDIO DI
ANALISI CINEMATICA TRIDIMENSIONALE (3D)
DEL MOVIMENTO.**

**DO PLANTS COUNT? A THREE-DIMENSIONAL (3D) KINEMATICAL
STUDY.**

Relatore

Prof. Umberto Castiello

Correlatrice

Dr. Silvia Guerra

Laureanda

Sara Marchetto

Matricola: 1187193

Anno Accademico 2022/2023

INDICE

INTRODUZIONE	3
CAPITOLO 1: LE PIANTE IN AZIONE	5
1.1. Charles Darwin e la circumnatazione	5
1.2. Il movimento “intenzionale” delle piante rampicanti	7
CAPITOLO 2: IL PROCESSO DELLA DISCRIMINAZIONE NUMERICA: DAGLI ANIMALI ALLE PIANTE	11
2.1. Discriminazione numerica negli esseri umani e altre specie animali	11
2.2. Discriminazione numerica nelle piante.....	15
CAPITOLO 3: ESPERIMENTO – LE PIANTE SONO IN GRADO DI PERCEPIRE DIVERSE QUANTITÀ DI ELEMENTI PRESENTI NELL’AMBIENTE?	18
3.1. Materiali e metodi	18
3.1.1. Campione sperimentale.....	18
3.1.2. Stimoli sperimentali	18
3.1.3. Condizioni di germinazione e crescita delle piante	19
3.1.4. Registrazione video e analisi dei dati.....	20
3.2. Risultati.....	21
CAPITOLO 4: DISCUSSIONE E CONCLUSIONE	23
BIBLIOGRAFIA	25

INTRODUZIONE

Le piante vengono solitamente classificate come esseri sessili statici, che reagiscono agli stimoli esterni in maniera puramente automatica. L'apparente immobilità delle piante e la loro impossibilità a spostarsi fisicamente da un luogo all'altro supportano l'idea che queste siano organismi passivi e non in grado di percepire ed interagire con l'ambiente circostante (Calvo & Keijzer, 2009). Le piante, in realtà, sono organismi molto più complessi di quanto possano sembrare a prima vista. Recenti evidenze scientifiche hanno infatti dimostrato come queste siano in grado di percepire diversi elementi ambientali, pianificare ed eseguire un comportamento adattivo verso il loro ambiente circostante per garantire la loro sopravvivenza (Calvo, 2018). Per esempio, le piante di pisello (*Pisum sativum* L.) sono in grado di percepire la presenza e assenza di un potenziale supporto nell'ambiente e di modificare il proprio movimento in termini di velocità e l'apertura dei propri cirri (i.e., foglie modificate che permettono alla pianta di aggrapparsi ad un supporto) in base alle diverse caratteristiche di esso (e.g., grandezza; Guerra, et al., 2019).

Quello che non è ancora stato indagato è se le piante siano in grado di discriminare diverse quantità di elementi presenti nell'ambiente e, se sì, come adattino il proprio comportamento di conseguenza. Questo elaborato si occuperà di analizzare le capacità di discriminare diverse quantità di diversi elementi nell'ambiente circostante nelle piante di pisello (*Pisum Sativum* L.) mediante l'analisi cinematica tridimensionale (3D) del movimento. Nello specifico, la presente tesi mira ad indagare se anche organismi senza cervello, come le piante, presentino abilità numeriche. Ad oggi le uniche evidenze riguardanti le abilità numeriche delle piante sono quelle relative alla Venere acchiappamosche (*Dionea muscipula* L.) che sembrerebbe essere in grado di tener traccia del numero di volte in cui i suoi meccanorecettori, ovvero peli sensibili che si trovano all'interno delle sue foglie, vengono stimolati da una possibile preda (e.g., insetto; Segundo-Ortin & Calvo, 2022). Ulteriori studi sono quindi necessari al fine di poter affermare se anche organismi senza un cervello presentino abilità numeriche e se sì, quanto queste abilità siano sofisticate rispetto a quelle osservate negli esseri umani e in diverse specie animali (e.g., pulcini, scimmie, rane, ...; (Stancher, Rugani, Regolin, & Vallortigara, 2015)). Al fine di poter indagare tale aspetto, sono state testate le piante di pisello (*Pisum sativum* L.) in due condizioni sperimentali: nella prima condizione vi

erano diverse quantità di elementi (i.e., 3 supporti vs 1 supporto; condizione sperimentale) mentre nella seconda vi erano le medesime quantità di elementi (i.e., 2 supporti vs 2 supporto; condizione di controllo). In particolare, è stato ipotizzato che se le piante di pisello sono in grado di percepire la quantità di potenziali supporti nell'ambiente, allora dovremmo osservare una preferenza verso il lato con più supporti. Questo perché aumenta le possibilità della pianta di aggrapparsi ad un supporto incrementando le sue possibilità di sopravvivenza. In alternativa, se le piante di pisello non sono in grado di percepire la quantità di potenziali supporti nell'ambiente, allora dovremmo osservare una scelta casuale fra i vari supporti. Al fine di permettere una buona comprensione delle ipotesi sperimentali e degli obiettivi dello studio verrà inizialmente introdotto il movimento nelle piante, a partire dalle analisi condotte dai Darwins, fino ad arrivare alla definizione del concetto di cognizione nel mondo vegetale (Capitolo 1). Verranno in seguito illustrati e descritti in dettaglio i vari casi di discriminazione numerica nel mondo animale e vegetale (Capitolo 2). Sarà poi presentata la ricerca che mi ha vista descrivendo in dettaglio i materiali e metodi, le analisi dei dati e risultati (Capitolo 3). Infine, si procederà a commentare i risultati preliminari dello studio condotto facendo riferimento alla letteratura scientifica precedente (Capitolo 4).

CAPITOLO 1: LE PIANTE IN AZIONE

Le piante sono considerate organismi sessili, immobili e non in grado di spostarsi come gli animali. In realtà le piante si muovono molto, ben più di quanto si creda, e sono in grado di compiere diverse tipologie di movimento (Darwin & Darwin, 1880). La difficoltà nel percepire il loro movimento risiede nel fatto che queste si muovano in una scala temporale diversa dalla nostra che rende il loro movimento non visibile ad occhio umano. Tuttavia, adottando tecniche di velocizzazione dei filmati (i.e., *timelapse*) siamo in grado di percepire ed apprezzare tutte le varie tipologie di movimento presentate dalle piante. Per esempio, le piante sono in grado di reagire a diversi stimoli ambientali, come luce, gravità, vento e sostanze chimiche, e questo movimento è regolato da una rete intricata di segnali di comunicazione (e.g., ormoni vegetali, proteine di segnalazione, canali ionici e altre molecole sono coinvolti in questo processo) tra le varie cellule interne alla pianta (Baluška & Mancuso, 2013). Ad un primo sguardo il movimento delle piante sembrerebbe essere una mera risposta automatica alle varie stimolazioni ambientali, ma come vedremo nella presente tesi non è così. Recenti studi hanno, infatti, dimostrato come il movimento delle piante non sia una semplice risposta automatica all'ambiente circostante, ma bensì pianificato e controllato per soddisfare i bisogni della pianta (Guerra, et al., 2019). Per esempio, le piante rampicanti sono in grado di percepire la presenza di un potenziale supporto nell'ambiente, codificare le proprietà di esso (e.g., dimensione), programmare ed eseguire un comportamento motorio verso di esso al fine di soddisfare un proprio bisogno, ovvero raggiungere la fonte di luce necessaria per la propria sopravvivenza.

1.1 Charles Darwin e la circumnatazione

Charles e Francis Darwin (1880) furono i primi ad accorgersi dell'incredibile varietà di movimenti e comportamenti che caratterizzano il regno vegetale e a riportarli, descrivendoli in modo minuzioso, all'interno del loro libro "*Il potere di movimento delle piante*" (Darwin & Darwin, 1880). Alla base di tutti i movimenti delle piante vi è la circumnatazione, movimento rotatorio degli organi della pianta lungo il suo asse centrale durante la fase di crescita (Darwin & Darwin, 1880; Figura 1). Il movimento di circumnatazione è un movimento universale e comune a tutte le piante e che può essere

modificato per il soddisfacimento dei bisogni della pianta (Darwin, 1875).

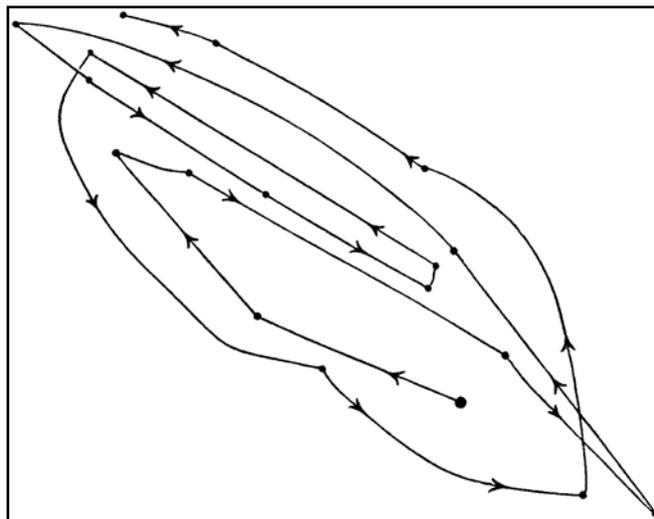


FIGURA 1. Schema rappresentativo del movimento di circunnatazione dei cotiledoni e dell'ipocotile appartenente alla pianta di *Brassica oleracea*, in un'osservazione durata 10 ore e 45 minuti

Inoltre, i Darwins (1880), osservarono che il movimento di circunnatazione può durare da pochi minuti a diverse ore, variando quindi in ampiezza, periodo, direzione e forma della traiettoria (Migliaccio, Tassone, & Fortunati, 2013; Stolarz, 2009). Dalle loro osservazioni, i Darwins (1880) ipotizzarono che questo movimento dovesse essere in qualche modo vantaggioso per la pianta, avanzando l'idea che tale comportamento potesse essere utilizzato dalle piante per esplorare l'ambiente circostante e ricercare in esso gli elementi utili e necessari per soddisfare un proprio bisogno. Ad esempio, i Darwins (1880) ipotizzarono che le piante rampicanti, organismi caratterizzati da uno stelo molto sottile e che necessitano di ricercare un supporto esterno a cui aggrapparsi per raggiungere facilmente la fonte di luce, potessero essere in grado di utilizzare il movimento di circunnatazione per esplorare l'ambiente e ricercare un supporto e, una volta identificato, modificare la traiettoria del loro movimento per raggiungerlo ed aggrapparsi ad esso (Darwin, 1875; Darwin & Darwin, 1880; Trewavas, 2016). In altre parole, contrariamente a quanto si pensa comunemente, i Darwins hanno avanzato l'idea che le piante non siano organismi passivi e statici, ma che siano capaci di agire in modo mirato e strategico per ottenere vantaggi nella loro crescita e nel loro sviluppo (Castiello & Guerra, 2020). Questa ipotesi è supportata da recenti evidenze che, come vedremo nel seguente paragrafo della presente tesi, hanno dimostrato come tali movimenti non sono solo una semplice reazione automatica alla stimolazione ambientale, ma il risultato di

una “pianificazione” da parte della pianta.

1.2 Il movimento “intenzionale” delle piante rampicanti

A partire dalle osservazioni dei Darwins (1880) sul comportamento vegetale, recenti evidenze hanno dimostrato come le piante siano in grado di elaborare informazioni in modo sofisticato, ben oltre la semplice risposta agli stimoli ambientali. Le piante, infatti, possono rilevare la presenza di organismi nocivi o concorrenti e attivare conseguenti risposte di difesa o di competizione per le risorse, inoltre possono modificare il loro comportamento in base alle informazioni acquisite (Castiello & Guerra, 2020; Cahill, 2010). Nel caso delle già citate piante rampicanti si è potuto osservare come esse utilizzino il proprio movimento di circumnutazione per esplorare l’ambiente e siano in grado di modificarlo in base alle diverse condizioni ambientali per soddisfare un proprio bisogno. In altre parole, le piante sono in grado di regolare il proprio comportamento in base alle loro intenzioni e di rispondere alle situazioni in modo flessibile e altamente adattivo (Castiello, 2020; Castiello & Guerra, 2020; Guerra, et al., 2019; Wang et al., 2021). In particolare, uno studio condotto sul fiore della passione (*Passiflora* L.), un genere di pianta rampicante, ha dimostrato come i suoi cirri (i.e., organi lunghi, sottili e flessibili delle piante rampicanti che permettono loro di avvolgersi attorno a sostegni) siano in grado di localizzare la posizione di un potenziale supporto presente nell’ambiente e di riadattare la traiettoria del proprio movimento anche quando quest’ultimo viene spostato, al fine di potercisi aggrappare (Wang et al., 2021). Ulteriori evidenze hanno dimostrato che le piante di pisello (*Pisum sativum* L.) sono in grado di percepire la presenza/assenza di un potenziale supporto nell’ambiente e di modulare il proprio movimento di avvicinamento ed aggrappo in base alla diversa grandezza del supporto, ma solo quando il supporto è percepito dalla pianta come “afferrabile” (Guerra et al., 2019). In particolare, Guerra e collaboratori (2019) hanno osservato, mediante l’analisi cinematica tridimensionale (3D) del movimento, che il movimento di avvicinamento ed aggrappo ad un potenziale supporto era più rapido per i supporti di più sottili rispetto ai supporti più spessi. Inoltre, la massima apertura dei cirri è maggiore per stimoli di spessore minore piuttosto che stimoli più grandi. Invece, se lo stimolo presentava una fotografia in 2D del potenziale supporto, essendo percepito dalla pianta come “inafferrabile”, quest’ultima non modulava la cinematica del proprio

movimento e il suo comportamento motorio era analogo a quella osservata in assenza di stimoli. Tali evidenze hanno dimostrato che le piante siano in grado di analizzare e percepire le caratteristiche fisiche dell'ambiente circostante e adattarsi di conseguenza. Un successivo studio di Wang e collaboratori (2023) ha poi indagato mediante l'analisi 3D del movimento come le piante di pisello (*Pisum sativum* L.) si comportano in un ambiente in cui sono presenti due potenziali supporti di diversa grandezza o in presenza di un singolo supporto. I risultati hanno evidenziato che queste dimostrano una chiara preferenza per i sostegni sottili rispetto a quelli spessi. Questi risultati evidenziano la capacità delle piante di pisello di valutare e selezionare attentamente i supporti più adatti alle loro esigenze, dimostrando una risposta selettiva basata sullo spessore dei supporti disponibili. Questo suggerisce che le piante adottino modelli di movimento più attivi ed esplorativi quando devono prendere decisioni basate su alternative (Wang, et al., 2023). Tali evidenze hanno dimostrato come le piante siano in grado di percepire gli elementi presenti nell'ambiente circostante, processarli ed elaborarli e pianificare ed eseguire un movimento funzione al soddisfacimento dei propri bisogni. Ma come possono fare tutto questo senza un cervello? In un'altra ricerca sperimentale, Guerra e collaboratori (2021) hanno testato il ruolo delle radici di pisello nel processo di codifica delle capacità intrinseche di un potenziale supporto presente nell'ambiente. In particolare, un gruppo di piante è stato testato in presenza di un supporto interrato di diversa grandezza e un altro gruppo di piante con un supporto di diversa grandezza, ma sollevato da terra e dunque non percepibile dalle radici. In base all'ipotesi formulata da Guerra e collaboratori (2021), se il sistema radicale delle piante non ha un ruolo nel processo di codifica della grandezza del supporto, la cinematica dei viticci non sarà influenzata dallo spessore dello stimolo, essendo quest'ultimo non accessibile al sistema radicale. Al contrario, se il sistema radicale ha un ruolo nel processo di codifica della grandezza del supporto, allora la cinematica dei cirri verrà modulata in base allo spessore dello stimolo. I risultati hanno dimostrato che quando il supporto non era accessibile all'apparato radicale, le piante di pisello non erano in grado di localizzare lo stimolo, se non toccandolo accidentalmente, né di modulare la cinematica del loro movimento in termine di velocità e apertura dei cirri in base alla grandezza del supporto. I risultati suggeriscono che le radici svolgano un ruolo cruciale nel percepire e processare i vari elementi ambientali (Guerra et al., 2021).

Possibili meccanismi fisiologici alla base di questo processo potrebbero essere la sensibilità alla stimolazione tattile, ovvero la capacità delle piante rampicanti di percepire il contatto fisico con un ostacolo, oppure potrebbe dipendere dall'accumulo di essudati radicali nella calotta radicale, delle sostanze organiche secrete dalle radici (Semchenko, Zobel, Heinemeyer & Hutchings, 2008).

Tali evidenze sono in linea con la “*root brain hypothesis*” di Charles Darwin (1880), secondo la quale il sistema radicale è paragonato al cervello di un “animale inferiore” ovvero un centro di comando in cui le informazioni sensoriali provenienti dalle radici vengono elaborate e trasformate in comandi motori complessi. In particolare, gli apici delle radici delle piante di pisello, che rappresentano la zona più sensibile situata tra 1,0 e 1,5 mm dal meristema, svolgono un ruolo cruciale nel monitorare l'ambiente circostante. Questi apici radicali sono in grado di percepire gli stimoli provenienti dall'ambiente esterno, comunicare con altre piante e adattare il loro movimento per superare gli ostacoli presenti nel terreno. Sembra che essi manifestino una risposta di orientamento positivo o negativo in base all'elaborazione dei diversi stimoli ambientali, dimostrando così una forma di sensibilità e adattamento ai cambiamenti nell'ambiente circostante. Ad oggi la letteratura scientifica non è concorde nell'identificare in maniera univoca la sede di questo “centro di comando”, ma quel che sembra esser evidente è che ci sia almeno un'area predisposta alla codifica e all'elaborazione degli stimoli esterni, in grado di agire di conseguenza compiendo azioni intenzionali con finalità adattive. In conclusione, sembrerebbe possibile affermare che anche organismi senza un cervello possiedano capacità cognitive.

Con cognizione, infatti, si intende *la facoltà di conoscere in quanto capacità di apprendere e valutare la realtà circostante* (Neisser, 1967). Questa definizione richiama il processo di acquisizione, elaborazione e memorizzazione con conseguente utilizzo di informazioni da parte di un organismo ed in particolare, si riferisce agli aspetti intellettivi e percettivi delle funzioni mentali, tipici di coloro che possiedono delle connessioni neuronali. Sebbene questo concetto sia comunemente associato agli animali, è importante evidenziare che anche le piante possiedono discrete capacità cognitive, nonostante ad una prima osservazione sembrano essere piuttosto immobili e con scarse competenze per quanto riguarda l'interazione con l'ambiente che le circonda. Esse, infatti, possiedono una cognizione sensoriale che implica capacità decisionali in

termini di comportamento arrivando persino a dimostrazioni di intelligenza prototipica (Baluška, Mancuso, Volkmann, & Barlow, 2009).

CAPITOLO 2: IL PROCESSO DELLA DISCRIMINAZIONE NUMERICA: DAGLI ANIMALI ALLE PIANTE

Una delle caratteristiche attribuibili al campo della cognizione è il processo di discriminazione numerica. Con il termine discriminazione numerica ci si riferisce al processo di quantificazione e discriminazione di quantità (McCrink & Wynn, 2007), ovvero alla capacità di individuare e distinguere quantità numeriche senza necessariamente avere una comprensione completa dei numeri come astrazioni matematiche (Anobile, 2021). Questa competenza negli esseri umani si declina nella capacità simbolica di quantificazione ed espressione di grandezze numeriche approssimative, nonché la relazione tra esse, e in quello definibile come “concetto di numero”, comprendente le operazioni matematiche basilari. Tale abilità è stata riscontrata anche in altre specie animali come, a titolo esemplificativo, alcune specie appartenenti al mondo dei mammiferi (e.g. *Cebus apella*), uccelli (e.g. *Gallus gallus*) ed anfibi (e.g. *Bombina orientalis*).

Anche nelle piante sono state osservate evidenze di discriminazione numeriche e, anche se la differenziazione di quantità numeriche nelle piante può essere considerata più semplice rispetto a quella degli animali, evidenzia comunque la presenza di processi cognitivi di base. La capacità di percepire e differenziare le quantità numeriche può essere un vantaggio adattativo per le piante, consentendo loro di regolare le proprie risposte fisiologiche in base a determinati numeri di oggetti o stimoli presenti nell'ambiente.

Nel seguente capitolo andremo a ripercorre le diverse evidenze di discriminazione numerica nelle prime fasi di vita dell'essere umano, in alcune specie del mondo animale ed inseguito in alcune specie di piante.

2.1 Discriminazione numerica negli esseri umani e altre specie animali

Numerose evidenze hanno dimostrato come le abilità numeriche siano già presenti nelle prime fasi dello sviluppo dell'essere umano. Un neonato preverbale è, per esempio, in grado di discriminare due quantità diverse di elementi (i.e., una certa quantità di Pac-Men gialli confrontata con un diverso numero di palline blu) quando le due quantità sono sufficientemente diverse, ovvero se tra le due sussiste un rapporto di

almeno 1 vs 2 (McCrink & Wynn, 2007). McCrink e Wynn (2007) hanno condotto un esperimento per indagare se i neonati fossero in grado di effettuare astrazioni relative ai rapporti numerici. Durante la fase di abituazione sono stati ripetutamente presentati ai neonati degli scenari contenenti Pac-men gialli e palline blu in una specifica proporzione. In seguito, sono state utilizzate due condizioni: una era congruente con l'aspettativa (i.e., conteneva la stessa proporzione di elementi presentata nella fase di abituazione) e una risultava incongruente. Al fine di misurare la reazione dei neonati è stato poi utilizzato il paradigma della preferenza visiva. In seguito, sono stati presentati due insiemi di oggetti uno dopo l'altro ed è stato misurato il tempo che i neonati hanno trascorso guardando ciascuno dei diversi insiemi. In particolare, McCrink e Wynn (2007) hanno ipotizzato che se i neonati fossero in grado di discriminare i diversi rapporti numerici, avrebbero manifestato un interesse maggiore per gli insiemi che presentavano un rapporto numerico diverso rispetto a quelli attesi. In altre parole, se i neonati erano sensibili alla differenza numerica, avrebbero guardato più a lungo gli insiemi che rappresentavano una deviazione rispetto all'aspettativa, quindi rispetto alla proporzione inizialmente presentata nella fase di abituazione. Dai risultati è emerso che i neonati sono in grado di discriminare rapporti numerici che differiscono almeno di un fattore 2, ma non sono in grado di distinguere la differenza tra due insiemi che differiscono di un fattore 1,5 rispetto allo stimolo di abituazione. Ciò significa che quando l'insieme di stimoli presentato era almeno il doppio rispetto a quello atteso, i neonati hanno mostrato un interesse maggiore e pertanto è stato rilevato un tempo di osservazione più lungo; ciò non è accaduto nel caso di proporzioni inferiori rispetto allo stimolo di abituazione. Questo indica una capacità innata dei neonati di estrarre e confrontare informazioni sui rapporti numerici.

Inoltre, è stato osservato che la capacità di discriminare i numeri si basa principalmente sulle differenze relative tra di essi anziché sulle differenze assolute. Ciò suggerisce l'esistenza di un sistema di rappresentazione numerica analogico, in cui la percezione dei numeri dipende dalla proporzione tra di essi. In altre parole, i bambini sono in grado di valutare e distinguere i numeri in base alle relazioni di proporzionalità tra di essi, piuttosto che valutare i numeri in modo assoluto (McCrink & Wynn, 2007). In conclusione, i risultati hanno dimostrato che i neonati hanno una capacità innata di percepire e discriminare i rapporti numerici. Questa abilità si basa sulla differenza

relativa tra i numeri e indica l'esistenza di un sistema di rappresentazione numerica analogico nel cervello dei neonati (McCrink & Wynn, 2007).

Gli studi condotti sui neonati suggeriscono che questo avvenga grazie a due sistemi distinti, uno dedicato all'elaborazione di piccole quantità che viene chiamato *Object file system* (OFS) e un altro, chiamato *Analog magnitude system* (AMS), sistema di stima analogica, che si occupa della stima di valori numerici più grandi (Feigenson, Carey, & Hauser, 2002). Il primo è un sistema rappresentazionale per piccole numerosità nel quale si rappresenta la numerosità implicitamente. L'equivalenza numerica tra le due quantità viene stabilita valutando la corrispondenza tra i file presenti nei due modelli rappresentati. Questo sistema, inoltre, possiede un limite di capacità (i.e., 3 oggetti), che possono essere immagazzinati contemporaneamente nella memoria di lavoro, e, nel caso di quantità maggiori, interviene l'AMS (Rugani, Cavazzana, Vallortigara, & Regolin, 2013). Quest'ultimo è un sistema approssimativo che permette di rappresentare quantità molto elevate senza un limite superiore definito. Tuttavia, è soggetto a limitazioni quando si tratta di discriminare tra due quantità basate sul rapporto tra di esse. In altre parole, se le quantità sono grandi, serve una differenza più significativa tra di loro per poterle discriminare (Cordes & Brannon, 2008). È quindi possibile identificare due sistemi preverbali distinti per la quantificazione dei numeri nei bambini e negli adulti (Cordes & Brannon, 2008). In sintesi, questi due sistemi numerici consentendo lo sviluppo di una rappresentazione accurata delle quantità in situazioni di piccole dimensioni.

Tali abilità sono state osservate anche in altre specie animali come uccelli, mammiferi ed anfibi. Per esempio, Rugani e collaboratori (2016) hanno indagato tale aspetto nei pulcini domestici (*Gallus gallus*) di soli 4 giorni di vita. Lo scopo dello studio era quello di indagare la discriminazione numerica nei pulcini di gallina domestica di 4 giorni di vita. Nella prima fase dello studio, i pulcini sono stati addestrati a discriminare due proporzioni specifiche (i.e., 4:1 e 2:1), venendo ricompensati con del cibo ogni volta che circumnavigavano lo stimolo rappresentante la proporzione corretta, ovvero la proporzione che vedeva raffigurati 4 punti verdi per ogni punto rosso, presentata accanto ad una neutra (i.e., 2 punti verdi per 1 punto rosso) e non ricompensata. I ricercatori hanno registrato il comportamento dei pulcini durante le prove di scelta, osservando quale insieme di oggetti i pulcini sceglievano di esplorare o

avvicinarsi. I pulcini hanno dimostrato con successo di essere in grado di percepire le grandezze numeriche relative e di discriminare con successo le due porzioni, scegliendo ed orientandosi verso la proporzione precedentemente ricompensata, quella caratterizzata da un rapporto di 4:1. In seguito, gli studiosi si sono concentrati sulla verifica delle capacità di generalizzazione di una proporzione target, ipotizzando che se i pulcini hanno appreso la proporzione target come un concetto assoluto, indipendente dalle proporzioni circostanti, selezioneranno coerentemente la configurazione che corrisponde alla proporzione target, anche se questa è confrontata con stimoli neutri che rappresentano proporzioni diverse. Anche in questo caso i pulcini sono riusciti nel compito. I risultati evidenziano come, poco dopo la nascita, il comportamento dei pulcini possa essere guidato dall'astrazione di informazioni proporzionali ricavate da elementi discreti, analogamente da quanto osservato in bambini di sei mesi (Rugani, McCrink, Hevia, & Regolin, 2016). Inoltre, dalle evidenze prodotte, i pulcini sembrerebbero utilizzare l'AMS anche per la rappresentazione di piccole che grandi numerosità. Tale sistema verrebbe attivato quando l'attenzione è rivolta all'insieme complessivo degli elementi, a discapito dell'OFS, che viene attivato quando questa è orientata sugli elementi individuali (Rugani, Regolin, & Vallortigara, 2013).

Ulteriori evidenze provengono da uno studio di Stancher e collaboratori (2015) condotto sulle rane (*Bombina orientalis*). Obiettivo di tale studio era di indagare se le rane, poste in condizione di poter esprimere la propria preferenza nella scelta di diverse quantità di *Tenebrio molitor larvae*, loro preda, dimostrassero di essere in grado di discriminare la numerosità dei diversi stimoli proposti. Le rane erano state posizionate singolarmente in una scatola di plastica in cui vi erano presenti due quantità diverse di larve. Le rane potevano esplorare lo spazio di destra o sinistra e direzionarsi verso la quantità di larve desiderata. I risultati hanno evidenziato che le rane mostrano una chiara preferenza verso il lato contenente la quantità di larve maggiore. I risultati, quindi, hanno dimostrato che le rane sono in grado di discriminare piccole numerosità in un contesto di scelta alimentare e di effettuare scelte basandosi sulla codifica delle numerosità dell'ambiente che le circonda (Stancher, Rugani, Regolin, & Vallortigara, 2015).

In un altro studio condotto da VanMarle e collaboratori (2006), sono state testate le capacità delle scimmie cappuccine (*Cebus apella*) nel processo di discriminazione di quantità maggiore in diverse condizioni. In due esperimenti separati, le scimmie

cappuccine sono state sottoposte a compiti di selezione della quantità maggiore tra due insiemi di oggetti discreti o sostanze non solide (i.e., dell'uvetta ricoperta di glassa allo yogurt o della purea di banana, entrambe sostanze molto appetibili). Nel primo esperimento, alle scimmie sono state presentate diverse quantità di cibo in sequenza (a partire da quella più grande o da quella più piccola) ed in seguito è stato chiesto loro di scegliere la quantità maggiore. In altre parole, hanno dovuto selezionare la quantità più grande di cibo nascosto in un compito di scelta ordinale. Nel secondo esperimento, hanno dovuto selezionare la quantità maggiore di sostanza non solida (purea di banana) versata nei bicchieri. I risultati hanno evidenziato che le scimmie cappuccine sono state in grado di discriminare la quantità maggiore in entrambi i tipi di compiti. Hanno ottenuto punteggi che escludevano il caso fortuito, indicando una capacità di discernere tra quantità diverse; inoltre, le prestazioni delle scimmie erano influenzate dal rapporto numerico tra gli insiemi, suggerendo una sensibilità alle differenze quantitative. Questi risultati contribuiscono alla comprensione delle capacità cognitive delle scimmie cappuccine e mostrano che sono in grado di effettuare valutazioni numeriche tramite modalità e con risultati simili ad altre specie, inclusi gli esseri umani (VanMarle, Aw, McCrink, & Santos, 2006).

In conclusione, le evidenze presentate indicano che la capacità di discriminare e comprendere le proporzioni numeriche non è limitata agli esseri umani, ma è riscontrabile anche in altre specie animali.

2.2 Discriminazione numerica nelle piante

Evidenze di discriminazione numerica nelle piante sono state riscontrate nel comportamento della Venere acchiappamosche (*Dionaea muscipula* L.; Figura 2).



Figura 2. Fotografia della Venere acchiappamosche (*Dionaea muscipula* L.). All'interno dei lobi delle foglie della pianta vi sono dei peli neri, che quando sollecitati elicitano da una preda inviano una risposta di chiusura della trappola, così da permettere alla pianta di trarre il nutrimento dalla propria preda.

Questa pianta carnivora è in grado di compiere rapidi movimenti in risposta ad una sollecitazione meccanica. In circa 100ms questo vegetale riesce a chiudere le proprie “trappole” per potersi così cibare della propria preda (Lee, Segundo-Ortin, & Calvo, 2023). È stato osservato come queste possano trarre beneficio dalle loro competenze numeriche durante il processo di “caccia” (Segundo-Ortin & Calvo, 2022). Sembra, infatti, che la Venere acchiappamosche sia in grado di tener traccia del numero di volte che i propri meccanorecettori vengono stimolati. Affinché la trappola si chiuda è infatti necessario che la seconda stimolazione avvenga in un tempo compreso tra i 20 e i 30 secondi dalla prima. In caso contrario il ciclo si resetta e la trappola rimane aperta (Segundo-Ortin & Calvo, 2022). Ulteriori evidenze provengono dagli studi sulle strategie di foraggiamento nelle piante (Cahill & McNickle, 2011).

Numerose evidenze hanno dimostrato che quando i nutrienti sono distribuiti in modo eterogeneo nel suolo, le piante generalmente sviluppano più radici in luoghi con concentrazioni di nutrienti più elevate (Hodge 2004, Kembel & Cahill 2005). Questa risposta comportamentale è stata definita proliferazione delle radici e precisione nel foraggiamento (e.g., una maggiore crescita delle radici o diminuzione della mortalità delle radici; de Kroon et al. 2009; Hodge 2004, 2006, 2009; Hutchings & de Kroon 1994; Kembel & Cahill 2005; Reynolds & Pacala 1993). Inoltre, Cahill e collaboratori (2010) hanno indagato il comportamento dell'apparato radicale nella pianta di *Abutilon theophrasti* in presenza o meno di concorrenti in un ambiente con distribuzione di nutrienti variabile. I risultati dell'esperimento hanno evidenziato che le piante di *Abutilon theophrasti* sono in grado di utilizzare informazioni sulla quantità di risorse disponibili e sulla presenza di potenziali competitori nell'ambiente per regolare l'estensione e la posizione delle proprie radici. Infatti, quando le piante crescono da sole, adottano una strategia di radicamento ampia e uniforme, indipendentemente dalla distribuzione delle risorse nel terreno indicando che la distribuzione delle risorse da sola non modifica la posizione delle radici. Al contrario, quando sono presenti dei competitori, le piante adottano diverse strategie di radicamento a seconda

dell'allocazione delle risorse.

Pertanto, sembrerebbe possibile affermare che le piante facciano proprie ed elaborino informazioni sia sulle risorse che sui vicini nell'ambiente, evidenziando una complessa capacità di risposta alla numerosità degli stimoli presenti nell'ambiente circostante (Cahill & al., 2010). In altre parole, la sensibilità numerica di questa pianta sembrerebbe essere essenziale nel compiere scelte con finalità adattive.

CAPITOLO 3: ESPERIMENTO – LE PIANTE SONO IN GRADO DI PERCEPIRE DIVERSE QUANTITÀ DI ELEMENTI PRESENTI NELL’AMBIENTE?

L'obiettivo di questo studio è quello di indagare se e come venga modulato il comportamento e movimento di raggiungimento e prensione nelle piante rampicanti di pisello in un ambiente con numerosi potenziali supporti. In altre parole, la presente tesi mira ad esplorare l'esistenza di capacità di discriminazione numerica nelle piante di pisello. A tal fine, le piante di pisello sono state testate in condizioni in cui l'ambiente conteneva la stessa quantità di supporti (i.e., 2 vs 2) o quantità diverse (i.e., 3 vs 1) mediante l'analisi 3D del movimento.

3.1. Materiali e Metodi

3.1.1 Campione sperimentale

Per l'esperimento sono state testate 16 piante di pisello (*Pisum sativum* L. var. *saccharatum* cv Carouby de Maussane; Tabella 1). Le piante di pisello sono state assegnate in modo casuale alle diverse condizioni sperimentali.

3.1.2 Stimoli sperimentali

Nella presente ricerca sono stati utilizzati 4 supporti di legno che venivano posizionati davanti alla pianta di pisello ad una distanza di 10 cm dalla pianta e a 8 cm dagli altri supporti (Figura 3). Nella condizione di controllo le piante sono state testate con medesima quantità di elementi nell'ambiente (i.e., 2 supporti vs 2 supporto; condizione di controllo; Figura 3A).

Mentre nella condizione sperimentale le piante sono state testate in una condizione con diversa quantità di elementi (i.e., 3 supporti vs 1 supporto; condizione sperimentale; Figura 3B).

A**B**

Figura 3. Fotografie rappresentanti le due condizioni sperimentali in cui sono state testate le piante di pisello: (A) medesima quantità di elementi nella condizione di controllo (i.e., 2 vs 2) o (B) diversa quantità di supporti (i.e., 3 vs 1)

3.1.3 Condizioni di germinazione e crescita delle piante

I semi sono stati piantati in vasi cilindrici di 30 cm di diametro e 15 cm di altezza, riempiti con sabbia silicea di fiume (tipo 16SS, dimensione 0.8/1.2 mm, peso 1.4), fertilizzata con una soluzione nutritiva a mezza forza (soluzione di micronutrienti di sale basale Murashige e Skoog; 10x, liquido, coltura cellulare vegetale testata; SIGMA Life Science). Ogni vaso conteneva un solo seme, piantato al centro del vaso e ad una profondità di 2.5 cm, ed era dotato di un sottovaso in cui venivano versati, a bisogno, fino a 500 ml di acqua tre volte a settimana. Ciascun vaso è stato posto in una camera di crescita (Cultibox SG combi 80x80x160 cm) per garantire che la germinazione e la crescita delle piante avvenissero in condizioni controllate. La temperatura interna alle camere di crescita è stata fissata a 26°C grazie ad un sistema di ventole, una estrartrice dotata di un termoregolatore (TT125; 125 mm- diametro; max 280 MC/H prese d'aria) ed una atta ad importare nuova aria all'interno della camera; la

combinazione delle due ventole, che erano poste in modo da non interferire con il naturale movimento delle piante, permetteva una permanenza media dell'aria di 60 secondi all'interno della camera, creandone un costante riciclo. In ogni camera di crescita, inoltre, le piante erano sottoposte a un fotoperiodo di 11.25 ore (dalle 5.45 del mattino alle 5 di sera), grazie all'uso di una lampada a led di colore bianco freddo (illuminazione a LED innovativa V-TAC, VT-911-100W, Des Moines, IA, USA) posta esattamente sopra ad ogni seme, ad una distanza di 50 cm. La densità del flusso fotosintetico dei fotoni a 50 cm sotto la lampada, in corrispondenza del seme, era di 350 $\mu\text{molPh/m}^2\text{s}$ (sensore quantistico LI-190R, Lincoln, Nebraska USA). Il rivestimento interno delle camere di crescita (Reflective Mylar®), infine, permetteva una migliore e più uniforme distribuzione della luce.

3.1.4 Registrazione video e analisi dei dati

In ogni camera di crescita sono state poste due telecamere ad infrarossi (i.e., IP 2.1 Mpx varifocale da esterno IR 1080P), ad una distanza di 45 cm una dall'altra e a 110 cm da terra, al fine di registrare le immagini del movimento della pianta durante la crescita. Ogni telecamera era connessa, tramite cavo Ethernet, a un router wireless a 10 porte (i.e., D-link Dsr-250n), connesso via WI-FI ad un computer in cui l'acquisizione e il salvataggio delle immagini erano controllate dal software CamRecorder (Ab.Acus s.r.l., Milano, Italia). I parametri di distorsione intrinseci, estrinseci e della lente di ogni telecamera sono stati stimati utilizzando l'applicazione Camera Calibrator di Matlab. Per l'estrazione dei parametri relativi ad ogni singola telecamera è stata utilizzata una speciale griglia di calibrazione a scacchiera.

Nel protocollo sperimentale di questo esperimento, le due telecamere di ogni camera di crescita sono state impostate per scattare, in sincronia, una foto della pianta ogni 3 minuti (frequenza 0.0056 Hz). In seguito, un software (Ab.Acus s.r.l., Milano, Italia), costruito ad-hoc su Matlab, è stato utilizzato per posizionare nelle foto ottenute dei marcatori in specifici punti anatomici della pianta, tracciarne la posizione foto dopo foto, e ricostruirne una traiettoria 3D. L'inizio del movimento è stato definito come il momento in cui i cirri della foglia analizzata erano sviluppati e chiaramente visibili all'osservatore, mentre la fine del movimento come il momento in cui i cirri raggiungevano e si aggrappavano allo stimolo sperimentale. I punti anatomici in cui sono stati posti i markers erano: l'apice

(ossia l'organo vegetale relativo alla crescita della pianta) e i cirri. Per avere dei punti di riferimento altri markers sono stati posti nei punti fermi della pianta: gli estremi dello stimolo, alla base della pianta e in corrispondenza della seconda foglia e l'internodo (i.e., il palco di foglie sottostante la foglia analizzata).

La procedura di *tracking* delle immagini acquisite da ogni telecamera è stata eseguita inizialmente in modo automatico seguendo la sequenza di movimento della pianta utilizzando l'algoritmo Kanade-Lucas-Tomasi (KLT). In seguito, lo sperimentatore ha riguardato la sequenza immagine dopo immagine, controllando la posizione dei marcatori e correggendo gli eventuali errori. La traiettoria 3D di ogni marcatore è infine stata calcolata triangolando le traiettorie 2D ottenute dalle due telecamere. Per la presente ricerca sono state considerate le traiettorie spaziali in tre dimensioni dei punti considerati.

3.2 Risultati

Tutti gli organi delle piante (i.e., l'apice, il nodo sottostante il palco di foglie analizzato e i cirri) hanno manifestato un movimento rotatorio di crescita, che inizialmente era diretto prevalentemente verso la fonte di luce e teso all'esplorazione ambientale per ricercare un potenziale supporto a cui la pianta poteva aggrapparsi. L'internodo e il punto di origine della pianta non presentavano il movimento di circumnutazione. I risultati qualitativi hanno evidenziato che le piante di pisello in presenza di una stessa quantità di elementi nell'ambiente (i.e., 2 vs 2) sceglievano in maniera causale uno dei 4 supporti presenti nell'ambiente (Figura 4A). Mentre, nella condizione sperimentale (i.e., 3 vs 1) la maggior parte delle piante di pisello ha diretto il proprio movimento di raggiungimento ed aggrappo verso la porzione di spazio in cui erano presenti più supporti (i.e., 8 su 11; 73%; Figura 4B). Solo una piccola parte del campione sperimentale (i.e., 3 su 11; 27%; Figura 4C) ha diretto il proprio movimento verso il singolo supporto.

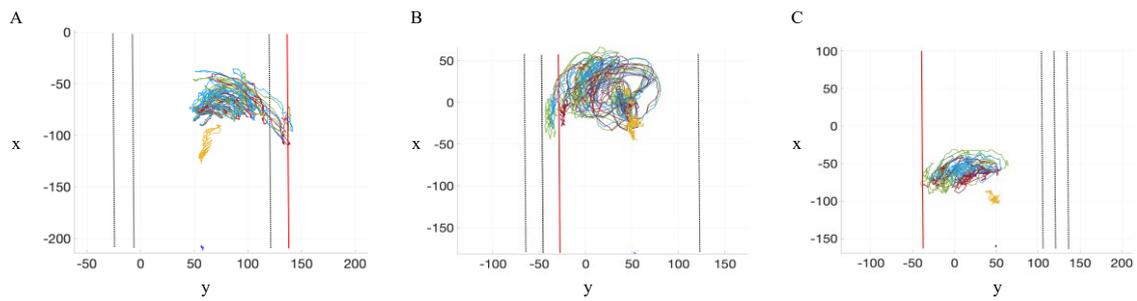


Figura 4. Rappresentazione grafica delle traiettorie spaziali in due dimensioni dei punti considerati delle piante osservate nello studio nelle due diverse condizioni sperimentali, ovvero nella condizione di controllo (2 vs 2; pannello A), e nella condizione sperimentale (3 vs 1; B e C). Nella condizione di controllo (A) la pianta presenta un movimento casuale, senza un'evidente preferenza per un particolare supporto. Nella condizione sperimentale la maggior parte delle piante di pisello dirige il proprio movimento verso la porzione di spazio in cui sono presenti più supporti(B), mentre solo in 3 casi degli 11 considerati, il movimento è direzionato verso il singolo supporto(C). Nella rappresentazione grafica, i punti considerati sono rappresentati in diversi colori, con l'apice in giallo e i cirri in rosso verde e blu. Il supporto a cui le piante si sono aggrappate è rappresentato con una linea rossa continua. Mentre gli altri supporti con una linea nera tratteggiata. L'asse delle ascisse è indicato con la lettera "x", mentre l'asse delle ordinate fa riferimento alla lettera "y".

CAPITOLO 4: DISCUSSIONE E CONCLUSIONE

Confrontando i dati ottenuti con gli studi sulla discriminazione numerica negli esseri umani, nei neonati e in altre specie animali, emerge una similitudine in termini di competenze numeriche tra queste diverse categorie. Appurato che la cognizione non sia prerogativa unicamente umana e prendendo in considerazione la letteratura riguardante la cognizione nel mondo vegetale, sembrerebbe possibile che le piante condividano una forma di sensibilità alle quantità simile a quella osservata negli animali, nonostante le loro caratteristiche uniche e l'assenza di un sistema nervoso. Questo rende ancora più affascinante l'idea che le piante possano avere una sorta di intenzionalità nel loro movimento, inclusa la capacità di discriminare tra diverse quantità.

Nella presente tesi è stato indagato il movimento di raggiungimento ed aggrappo di 16 piante di pisello (*Pisum sativum* L.), osservate in due diverse condizioni sperimentali, al fine di esplorare le possibili capacità di discriminazione numerica in presenza di più supporti nell'ambiente.

I risultati hanno evidenziato che in presenza della stessa quantità di elementi nell'ambiente (i.e., 2 vs 2), le piante sceglievano casualmente uno dei quattro supporti disponibili; nella condizione sperimentale (i.e., 3 vs 1), invece, la maggior parte delle piante ha manifestato un movimento orientato verso la porzione di spazio in cui erano presenti più supporti. Questo suggerisce una preferenza delle piante verso quantità maggiori di supporti. I risultati hanno evidenziato che questi vegetali sono in grado di percepire le diverse quantità di elementi presenti nell'ambiente e di adattare il proprio comportamento motorio al fine di aumentare le possibilità di sopravvivenza, ovvero direzionandosi verso la porzione di spazio in cui sono presenti più supporto. In altre parole, i risultati evidenziano una forma di sensibilità alle quantità anche in organismi senza cervello, come le piante.

Tuttavia, il concetto di discriminazione numerica nel regno vegetale richiede ulteriori approfondimenti, poiché è ancora un campo di ricerca relativamente poco esplorato. Per esempio, ulteriori studi potrebbero indagare se il processo di discriminazione di quantità è presente in altre specie di piante rampicanti (o non). Inoltre, sarebbe necessario indagare ulteriormente il possibile meccanismo fisiologico alla base del processo di discriminazione di quantità in organismi senza un cervello, come nelle piante.

L'approfondimento della presenza di abilità di discriminazione numerica nelle piante

potrebbe offrire importanti intuizioni sulle capacità cognitive delle piante e sul modo in cui interagiscono con l'ambiente circostante.

BIBLIOGRAFIA

- Anobile, G. A. (2021). A sensorimotor numerosity system. *Trends in Cognitive Sciences*.
- Baluška, F., & Mancuso, S. (2013). Root apex transition zone as oscillatory zone. *Frontiers in Plant science*.
- Baluška, F., Mancuso, S., Volkmann, D., & Barlow, P. (2009). The 'root-brain' hypothesis of Charles and Francis Darwin. *Plant Signaling & Behavior*.
- Cahill, J. F. (2010). Plants Integrate Information About Nutrients and Neighbors. *Science*. Cahill, J. F., & al., e. (2010). Plants Integrate Information About Nutrients and Neighbors. *Science*.
- Calvo, P. (2018). Plantae. In *Encyclopedia of Animal Cognition and Behavior*.
- Calvo, P., & Keijzer, F. A. (2009). Cognition in plants. *Plant-environment interactions: Behavioral perspective*.
- Castiello, U., & Guerra, S. (2020). La psicologia vegetale: alle radici della cognizione. *Giornale italiano di psicologia*.
- Cordes, & Brannon. (2008). Quantitative competencies in infancy. *Developmental Science*. Cordes, S., & Brannon, E. (2008). Quantitative competencies in infancy. *Developmental Science*.
- Darwin, C., & Darwin, F. (1880). *The Power of Movement in Plants*.
- Feigenson, L., Carey, S., & Hauser, M. (2002). The Representations Underlying Infants' Choice of more: Object Files Versus Analog Magnitudes. *Psychological Science*.
- Guerra, Bonato, Wang, Ceccarini, Peressotti, Peressotti, . . . Castiello, B. &. (2021). Coding of Object Thickness in Plants: When Roots Matter. *Journal of Comparative Psychology*.
- Guerra, S., Peressotti, A., Peressotti, F., Bulgheroni, M., Baccinelli, W., D'amico, E., & Castiello, U. (2019). Flexible control of movement in plants. *Sci Rep*.
- Lee, J., Segundo-Ortin, M., & Calvo, P. (2023). Decision Making in Plants: A Rooted Perspective. *Plant Signaling, Behavior and Communication*.

- McCrink, K., & Wynn, K. (2007). Ratio Abstraction by 6-Month-old Infants.
- Migliaccio, Tassone, & Fortunati. (2013). Circumnutation as an autonomous root movement in plants. *American Journal of Botany*.
- Parise, G. S. (2020). Extended cognition in plants: is it possible? *Plant signaling & Behavior*.
- Q. Wang, S. G. (2021). Sowing the seeds of intentionality: Motor intentions in plants. *Plant Signaling & Behavior*.
- Rugani, Betti, Ceccarini, & Sartori. (2017). Act on Numbers: Numerical Magnitude Influences Selection and Kinematics of Finger Movement. *Frontiers in Psychology*.
- Rugani, McCrink, Hevia, & Regolin, V. &. (2016). Ratio abstraction over discrete magnitudes by newly hatched domestic chicks (*Gallus gallus*). *Scientific reports*.
- Rugani, R., Cavazzana, A., Vallortigara, G., & Regolin, L. (2013). One, two, three, four, or is there something more? Numerical discrimination in day-old domestic chicks. *Animal Cogn*.
- Rugani, Regolin, & Vallortigara. (2013). From small to large. Numerical discrimination by young chicks. *Journal of Comparative Psychology*.
- Segundo-Ortin, & Miguel and Calvo, P. (2023).) Plant sentience? Between romanticism and denial: Science. *Animal Sentience*.
- Segundo-Ortin, M., & Calvo, P. (2022). Consciousness and cognition in plants.
- Semchenko, M., Zobel, K., Heinemeyer, A., & & Hutchings, M. J. (2008). Foraging for space and avoidance of physical obstructions by plant roots: A comparative study of grasses from contrasting habitats. *The New Phytologist*.
- Simonetti, V., Bulgheroni, M., Guerra, S., Peressotti, A., Peressotti, F., Baccinelli, W., Castiello, U. (2021). Can Plants Move Like Animals? A Three-Dimensional Stereovision Analysis of Movement in Plants. *Animals*.
- Stancher, Rugani, Regolin, & Vallortigara. (2015). Numerical discrimination by frogs (*Bombina orientalis*).
- Stolarz, M. (2009). Circumnutation as a visible plant action and reaction: physiological, cellular and molecular basis for circumnutations. *Plant signaling & behavior*.
- Trewavas, A. (2016). Intelligence, Cognition and Language of Green Plants. *Frontiers*

in psychology.

VanMarle, K., Aw, J., McCrink, K., & Santos, L. (2006). How Capuchin Monkeys (Cebus apella) Quantify Objects and Substances. *Journal of Comparative Psychology.*

Wang, Q., Guerra, S., Bonato, B., Simonetti, V., Bulgheroni, M., & Castiello, U. (2023). Decision-Making Underlying Support-Searching in Pea Plants. *Plants.*

Xu, F. & Spelke, E. (2000). Large number discrimination in 6-month-old infants. *Cognition.*