



UNIVERSITÀ DI ROMA “LA SAPIENZA”

FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE FISICHE E NATURALI

Corso di Laurea Magistrale in Ecobiologia

TESI DI LAUREA

Prima caratterizzazione della struttura acustica dei suoni pulsati e multi-componente in *Globicephala melas* nell'area del Santuario Pelagos

Candidata:
Giorgia Pino
Matricola 1657932

Giorgia Pino

Relatore:
Prof.ssa Daniela Silvia Pace
Dipartimento di Biologia Ambientale

Daniela Silvia Pace

Relatore esterno:
Dott.ssa Caterina Lanfredi
Istituto Tethys Onlus

Caterina Lanfredi

Anno Accademico 2022-2023

INDICE

INTRODUZIONE E SCOPO DEL LAVORO	8
Capitolo 1 – ACUSTICA DEI CETACEI ODONTOCETI.....	9
1.1 Produzione e ricezione dei suoni	9
1.2 Caratteristiche e tipologie di suoni	12
1.3 Funzioni	14
Capitolo 2 - IL GLOBICEFALO (<i>Globicephala melas</i>)	18
2.1 Biologia ed ecologia	18
2.2 Struttura sociale	20
2.3 Repertorio acustico.....	21
2.4 Distribuzione e minacce	24
Capitolo 3 - MATERIALI E METODI.....	27
3.1 Area di studio.....	27
3.2 Raccolta dati	28
3.3 Analisi acustiche	30
3.3.1. Classificazione sulla base della qualità	30
3.3.2. Caratterizzazione dei suoni pulsati	33
3.3.3. Classificazione dei suoni pulsati in “call type”	35
3.3.4. Classificazione delle “call type” in macrocategorie	35
3.4 Analisi di contesto sociale e ambientali	36
3.5 Analisi statistiche.....	37
Capitolo 4 – RISULTATI	41
4.1 Identificazione, catalogazione e descrizione acustica dei suoni pulsati.....	41
4.1.1 Qualità.....	41
4.1.2 Tassi di emissione (ER)	42
4.1.3 Categorie e macrocategorie	43
4.1.4 Frequenze e tassi di emissione delle macrocategorie.....	50
4.1.5 Catene Markoviane	53
4.1.6 Parametri acustici	55

4.1.7 Componente ad alta frequenza (HFC)	58
4.1.8 Complessità	59
4.2 Variabilità acustica in base ai contesti di emissione	60
4.2.1 Contesto sociale	60
4.2.2 Contesto ambientale.....	70
4.2.3 Correlazione tra il contesto sociale e ambientale e le macrocategorie.....	72
Capitolo 5 – DISCUSSIONE	76
APPENDICE	86
BIBLIOGRAFIA	106
SITOGRAFIA	111

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1 - Rappresentazione grafica del sistema di produzione di suoni del globicefalo (da: Nemiroff & Whitehead, 2009).....	10
Figura 1.2 - Spettrogramma di un suono pulsato di globicefalo identificato nel presente studio (Hann window, FFT 1024, 3 dB Filter Bandwidth: 135 Hz, Overlap 90%, Hop Size: 102).....	13
Figura 1.3 - Spettrogramma di un suono pulsato di globicefalo identificato nel presente studio caratterizzato da una componente a frequenza più alta (High Frequency Component, HFC) e da una componente a frequenza più bassa (Lower Frequency Component, LFC) (Hann window, FFT 1024, 3 dB Filter Bandwidth: 135 Hz, Overlap 90%, Hop Size: 102).....	13
Figura 2.1 - Il Globicefalo (<i>Globicephala melas</i>), foto ©Istituto Tethys Onlus.....	18
Figura 2.2 - Gruppo di globicefali fotografato nel Mar Ligure nordoccidentale, foto ©Istituto Tethys Onlus.....	20
Figura 2.3 - Spettrogrammi che mostrano le tre tipologie di vocalizzazioni prodotte dal globicefalo. (a) click, (b) un fischio e (c) un suono pulsato (da: Nemiroff 2009).....	21
Figura 2.4 - Spettrogramma che mostra la struttura di una pulsed call prodotta dal globicefalo (da: Nemiroff 2009). Parametri: Element: elemento; Upper frequency component (UFC): componente a frequenza più alta; Lower frequency component (LFC): componente a frequenza più bassa; Sideband interval (SBI): intervallo di banda.....	22
Figura 2.5 - Distribuzione del globicefalo (<i>Globicephala melas</i>) in Mediterraneo e nello Stretto di Gibilterra (Verborgh et al., 2016).....	25
Figura 3.1 - Mappa del Santuario Pelagos, che si estende dalle coste Nord della Sardegna lambendo le coste della Liguria e della Francia. In dettaglio l'area di studio dell'Istituto Tethys Onlus; la "Core Area" indica la zona con maggior sforzo di ricerca negli anni (da: Lanfredi et al., 2021, mappa Valentina De Santis).....	27
Figura 3.2 - Imbarcazione "RV Pelagos" utilizzata da Tethys nell'ambito del progetto CSR, con un gruppo di globicefali (foto proprietà ©Istituto Tethys Onlus).....	29
Figura 3.3 - Tecniche di monitoraggio visivo (a destra) e acustico (a sinistra) condotte dall'Istituto Tethys a bordo dell'imbarcazione da ricerca RV Pelagos, (foto proprietà ©Istituto Tethys Onlus).....	29
Figura 3.4 - Esempio di attribuzione della qualità sui suoni pulsati. (a) qualità 0, (b) qualità 1, (c) qualità 2, (d) qualità 3 (Hann window, FFT 1024, 3 dB Filter Bandwidth: 135 Hz, Overlap 90%, Hop Size: 102).....	32
Figura 3.5 - Esempio di selezione di un suono pulsato di qualità uguale o superiore a 2 e delle sue componenti. Nell'immagine, la selezione 1 indica il suono pulsato nella sua interezza, formato da: un primo elemento ascendente (A; selezione 2); un secondo, un terzo e un quarto elemento di forma convessa (Cx; selezioni 3,4 e 5), e un quinto elemento discendente (D; selezione 6) (Hann window, FFT 1024, 3 dB Filter Bandwidth: 135 Hz, Overlap 90%, Hop Size: 102).....	33
Figura 4.1 - Distribuzione dei 15 avvistamenti di <i>G. melas</i> nell'area di studio nel periodo 2011-2022.....	41
Figura 4.2 - Spettrogramma che mostra la macrocategoria B (selezione 1, a sinistra) seguita dalla macrocategoria E (selezione 2, a destra).....	55
Figura 4.3 - Boxplot che mostra la variabilità della durata dei suoni pulsati in relazione alla presenza/assenza di una componente HFC.....	59
Figura 4.4 - Boxplot dei parametri acustici in relazione alla complessità del suono. a) Frequenza minima; b) Frequenza massima; c) Range di Frequenza.....	60
Figura 4.5 - Boxplot che mostrano la variabilità del numero di elementi (a) e del numero di segmenti (b) dei 1591 suoni pulsati in relazione alla presenza/assenza di giovani.....	61
Figura 4.6 - Boxplot che mostra la variabilità del numero di segmenti dei 1591 suoni pulsati in relazione alla presenza/assenza di piccoli.....	62
Figura 4.7 - Boxplot che mostrano la variabilità del numero di elementi (a) e del numero di segmenti (b) dei 1591 suoni pulsati in relazione alla presenza/assenza di neonati.....	62
Figura 4.8 - Boxplot che mostrano la variabilità del numero di elementi (a) e del numero di segmenti (b) dei 1591 suoni pulsati in relazione alla group size.....	63
Figura 4.9 - Boxplot che mostrano la variabilità dei parametri acustici in relazione alla presenza/assenza di piccoli (calf). a) Durata; b) Frequenza minima.....	64
Figura 4.10 - Boxplot che mostrano la variabilità dei parametri acustici in relazione alla presenza/assenza di neonati. a) Durata; b) Frequenza minima.....	64

<i>Figura 4.11 - Boxplot che mostrano la variabilità dei parametri acustici in relazione alla group size. a) Durata; b) Frequenza minima; c) Frequenza massima; d) Range di frequenza.....</i>	66
<i>Figura 4.12 - Boxplot che mostrano la variabilità dei parametri acustici della componente HFC in relazione alla presenza/assenza di giovani. a) Frequenza minima; b) Frequenza iniziale; c) Frequenza finale; d) Numero di punti di inflessione.....</i>	67
<i>Figura 4.13 - Boxplot che mostrano la variabilità dei parametri acustici della componente HFC in relazione alla group size. a) Durata; b) Frequenza minima; c) Frequenza iniziale; d) Frequenza finale; e) Numero di punti di inflessione.....</i>	69
<i>Figura 4.14 - Boxplot che mostrano la variabilità dei parametri acustici in relazione alla fascia di profondità. a) Durata; b) Frequenza minima.....</i>	71
<i>Figura 4.15 - Boxplot che mostrano la variabilità dei parametri acustici della componente HFC in relazione alla fascia di profondità. a) Durata; b) Numero di punti di inflessione; c) Frequenza minima; d) Frequenza iniziale; e) Frequenza finale.....</i>	72
<i>Figura 4.16 - Boxplot che mostra la variabilità del numero di ripetizioni dell'elemento C in relazione al numero di piccoli.....</i>	73
<i>Figura 4.17 - Boxplot che mostra la variabilità del numero di ripetizioni dell'elemento C all'interno della macrocategoria B in relazione alla group size.....</i>	74
<i>Figura 4.18 - Boxplot che mostrano la variabilità del numero di ripetizioni dell'elemento C (a) e Cv (b) in relazione alla fascia di profondità.....</i>	75
<i>Figura A.2 - Spettrogramma di un suono pulsato (con HFC) appartenente alla macrocategoria A.....</i>	88
<i>Figura A.3 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria AA.....</i>	88
<i>Figura A.4 - Spettrogramma di un suono pulsato (con HFC) appartenente alla macrocategoria B.....</i>	89
<i>Figura A.5 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria BB.....</i>	89
<i>Figura A.6 - Spettrogramma di una componente HFC appartenente alla macrocategoria C.....</i>	90
<i>Figura A.7 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria CC.....</i>	90
<i>Figura A.8 - Spettrogramma di un suono pulsato (con HFC) appartenente alla macrocategoria D.....</i>	91
<i>Figura A.9 - Spettrogramma di un suono pulsato (con HFC) appartenente alla macrocategoria DD.....</i>	91
<i>Figura A.10 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria E.....</i>	92
<i>Figura A.11 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria EE.....</i>	92
<i>Figura A.12 - Spettrogramma di un suono pulsato (con HFC) appartenente alla macrocategoria F.....</i>	93
<i>Figura A.13 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria FF.....</i>	93
<i>Figura A.14 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria G.....</i>	94
<i>Figura A.15 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria GG.....</i>	94
<i>Figura A.16 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria H.....</i>	95
<i>Figura A.17 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria I.....</i>	95
<i>Figura A.18 - Spettrogramma di un suono pulsato (con HFC) appartenente alla macrocategoria J.....</i>	96
<i>Figura A.19 - Spettrogramma di un suono pulsato (con HFC) appartenente alla macrocategoria K.....</i>	96
<i>Figura A.20 - Spettrogramma di un suono pulsato (con HFC) appartenente alla macrocategoria L.....</i>	97
<i>Figura A.21 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria M.....</i>	97
<i>Figura A.22 - Spettrogramma di un suono pulsato (con HFC) appartenente alla macrocategoria N.....</i>	98
<i>Figura A.23 - Spettrogramma di un suono pulsato (con HFC) appartenente alla macrocategoria O.....</i>	98
<i>Figura A.24 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria P.....</i>	99
<i>Figura A.25 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria Q.....</i>	99
<i>Figura A.26 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria R.....</i>	100
<i>Figura A.27 - Spettrogramma di un suono pulsato (con HFC) appartenente alla macrocategoria S.....</i>	100
<i>Figura A.28 - Spettrogramma di un suono pulsato (con HFC) appartenente alla macrocategoria T.....</i>	101
<i>Figura A.29 - Spettrogramma di un suono pulsato (con HFC) appartenente alla macrocategoria U.....</i>	101
<i>Figura A.30 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria V.....</i>	102

<i>Figura A.31 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria W.....</i>	102
<i>Figura A.32 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria X.....</i>	103
<i>Figura A.33 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria Y.....</i>	103
<i>Figura A.34 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria Z.....</i>	104

INDICE DELLE TABELLE

<i>Tabella 1.1 - Tabella che illustra le famiglie e il relativo numero di specie appartenenti al sottordine degli odontoceti.....</i>	9
<i>Tabella 2.1 - Tassonomia di globicefalo (G. melas).....</i>	18
<i>Tabella 3.1 - Definizione dei parametri acustici misurati durante le analisi (Adattato da Nemiroff 2009).....</i>	34
<i>Tabella 3.2 - Variabili quantitative e variabili categoriali utilizzate nello studio.....</i>	38
<i>Tabella 3.3 - Quadro di sintesi dei test statistici utilizzati in questo lavoro.....</i>	38
<i>Tabella 4.1 - Tabella che illustra sinteticamente la frequenza e la percentuale delle qualità dei suoni pulsati raccolti.....</i>	41
<i>Tabella 4.2 - Numero di suoni pulsati e tassi di emissione (ER, Emission Rate) per registrazione e per avvistamento.....</i>	42
<i>Tabella 4.3 - Tabella che illustra la classificazione delle 77 categorie di suoni pulsati nelle 33 macrocategorie e la loro composizione in tipologie di elementi.....</i>	44
<i>Tabella 4.4 - Frequenza delle 33 macrocategorie per tutti i 15 avvistamenti.....</i>	50
<i>Tabella 4.5 - Frequenze totali delle macrocategorie più emesse.....</i>	51
<i>Tabella 4.6 - Emission Rate per avvistamento delle 16 macrocategorie più frequenti.....</i>	51
<i>Tabella 4.7 - Emission Rate medi per avvistamento delle 16 macrocategorie più frequenti.....</i>	51
<i>Tabella 4.8 - Variabilità della struttura delle macrocategorie più frequenti. La lettera "n" rappresenta il numero di ripetizioni della tipologia di elemento che caratterizza la struttura della macrocategoria. I valori di n sono riportati nella colonna "N° ripetizioni elemento". Il numero di elementi si riferisce al numero di elementi totali costituenti un suono, che tiene conto del numero di ripetizioni dell'elemento e della presenza/assenza dell'elemento HFC (componente ad alta frequenza).....</i>	52
<i>Tabella 4.9 - Matrice di transizione che mostra una probabilità di transizione tra le macrocategorie maggiore di 0.5.....</i>	54
<i>Tabella 4.10 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità (N= 286).....</i>	55
<i>Tabella 4.11 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per le 7 tipologie di elemento costituenti i 286 suoni pulsati di buona qualità.....</i>	56
<i>Tabella 4.12 - Statistiche descrittive dei parametri acustici SBI iniziale e finale calcolati per le 5 tipologie di elemento.....</i>	58
<i>Tabella 4.13 - Risultati del test post hoc di Dunn per il confronto a coppie delle 3 categorie di group size. a) Numero di elementi; b) Numero di segmenti.....</i>	63
<i>Tabella 4.14 - Risultati del test post hoc di Dunn per il confronto a coppie delle 3 categorie di group size. a) Durata; b) Frequenza Minima; c) Frequenza Massima; d) Range di Frequenza.....</i>	66
<i>Tabella 4.15 - Risultati del test post hoc di Dunn per il confronto a coppie delle 3 categorie di group size. a) Durata; b) Frequenza minima; c) Frequenza iniziale; d) Frequenza finale; e) Numero di punti di inflessione.....</i>	69
<i>Tabella 4.16 - Risultati del test post hoc di Dunn per il confronto a coppie delle 4 categorie del numero di piccoli.....</i>	74
<i>Tabella 4.17 - Risultati del test post hoc di Dunn per il confronto a coppie delle 3 categorie di group size.....</i>	74
<i>Tabella A.1 - Tabella che illustra un riepilogo delle quantità di elementi e di segmenti e delle tipologie di elementi che costituiscono le 77 categorie di suoni pulsati.....</i>	86
<i>Tabella A.2 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria A (N= 19)</i>	87
<i>Tabella A.3 - Parametri acustici calcolati per il suono pulsato di buona qualità appartenente alla macrocategoria AA (N= 1).....</i>	88
<i>Tabella A.4 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria B (N= 29)</i>	88
<i>Tabella A.5 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria BB (N= 9)</i>	89

<i>Tabella A.6 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria C (N= 3)</i>	89
<i>Tabella A.7 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria CC (N= 5)</i>	90
<i>Tabella A.8 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria D (N= 4)</i>	90
<i>Tabella A.9 - Parametri acustici calcolati per il suono pulsato di buona qualità appartenente alla macrocategoria DD (N= 1).....</i>	91
<i>Tabella A.10 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria E (N= 6)</i>	91
<i>Tabella A.11 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria EE (N= 10)</i>	92
<i>Tabella A.12 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria F (N= 9)</i>	92
<i>Tabella A.13 - Parametri acustici calcolati per il suono pulsato di buona qualità appartenente alla macrocategoria FF (N= 1).....</i>	93
<i>Tabella A.14 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria G (N= 14)</i>	93
<i>Tabella A.15 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria GG (N= 41)</i>	94
<i>Tabella A.16 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria H (N= 24)</i>	94
<i>Tabella A.17 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria I (N= 4)</i>	95
<i>Tabella A.18 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria J (N= 5)</i>	95
<i>Tabella A.19 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria K (N= 5).....</i>	96
<i>Tabella A.20 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria L (N= 7).....</i>	96
<i>Tabella A.21 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria M (N= 2).....</i>	97
<i>Tabella A.22 - Parametri acustici calcolati per il suono pulsato di buona qualità appartenente alla macrocategoria N (N= 1).....</i>	97
<i>Tabella A.23 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria O (N= 2).....</i>	98
<i>Tabella A.24 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria P (N= 31).....</i>	98
<i>Tabella A.25 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria Q (N= 7).....</i>	99
<i>Tabella A.26 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria R (N= 3).....</i>	99
<i>Tabella A.27 - Parametri acustici calcolati per il suono pulsato di buona qualità appartenente alla macrocategoria S (N= 1).....</i>	100
<i>Tabella A.28 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria T (N= 4).....</i>	100
<i>Tabella A.29 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria U (N= 27).....</i>	101
<i>Tabella A.30 - Parametri acustici calcolati per il suono pulsato di buona qualità appartenente alla macrocategoria V (N= 1).....</i>	101
<i>Tabella A.31 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria W (N= 2).....</i>	102
<i>Tabella A.32 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria X (N= 3).....</i>	102

<i>Tabella A.33 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria Y (N= 4).....</i>	103
<i>Tabella A.34 - Parametri acustici calcolati per il suono pulsato di buona qualità appartenente alla macrocategoria Z (N= 1).....</i>	103
<i>Tabella A.35 - Tabella di frequenza delle 33 macrocategorie per tutte le 34 registrazioni.....</i>	104

INTRODUZIONE E SCOPO DEL LAVORO

Il globicefalo (*Globicephala melas*) è un cetaceo odontocete largamente diffuso nella maggior parte degli oceani con una distribuzione anti-tropicale. Come la maggior parte degli odontoceti, è una specie estremamente vocale e il suo repertorio acustico è rappresentato principalmente da tre categorie di suoni: *Click*, fischi (*Whistles*) e suoni pulsati (*Burst-pulsed sounds*). I click sono suoni impulsivi a banda larga utilizzati principalmente per l'ecolocalizzazione, durante la navigazione e l'alimentazione. I fischi sono suoni tonali a banda stretta, con o senza armoniche, che sono utilizzati nella coordinazione e coesione del gruppo. I *burst-pulsed sounds* sono suoni impulsivi a banda larga composti da click prodotti in sequenza con un'elevata frequenza di ripetizione ed un intervallo di tempo molto breve tra click successivi, tanto da far assumere a questi suoni caratteristiche spettrali tipiche dei suoni tonali.

Una parte importante del repertorio acustico dei globicefali è rappresentata dalle *pulsed calls*, una tipologia di *burst-pulsed sound* con una probabile funzione comunicativa. Questi suoni sono stati poco studiati; tuttavia, quelli prodotti da questa specie sono molto simili a quelli presenti nel repertorio vocale delle orche (*Orcinus orca*). Vengono descritti come strutturalmente complessi, caratterizzati da componenti multiple e modulate in modo indipendente, con la presenza di elementi tonali e pulsati prodotti simultaneamente. Ad oggi, la letteratura non riporta studi specifici riguardo i suoni pulsati e i suoni multicomponente del globicefalo in Mediterraneo.

L'obiettivo di questo lavoro, realizzato grazie alla collaborazione scientifica tra il Dipartimento di Biologia Ambientale e l'istituto Tethys Onlus, è stato quello di caratterizzare i suoni pulsati e i suoni multicomponente emessi dal globicefalo nell'area del Santuario Pelagos (Mar Ligure). In particolare, lo studio è stato effettuato con lo scopo di:

- Quantificare e caratterizzare (attraverso l'estrazione di parametri acustici specifici) per la prima volta i suoni pulsati e i suoni multicomponente emessi dalla popolazione di globicefalo residente nell'area del Santuario Pelagos;
- Individuare una specificità delle vocalizzazioni tale da definire categorie distinte di suoni pulsati e multicomponente della popolazione nell'area indagata;
- Testare l'ipotesi di una stabilità nel tempo (tra anni diversi e all'interno della stessa stagione) di queste vocalizzazioni;
- Determinare l'eventuale variabilità acustica delle categorie di suoni pulsati in relazione al contesto ambientale (profondità, distanza dalla costa, tipo di habitat) e sociale (*group size*, presenza di piccoli).

Capitolo 1 – ACUSTICA DEI CETACEI ODONTOCETI

1.1 Produzione e ricezione dei suoni

I Cetacei sono un ordine di mammiferi acquatici, nella quasi totalità marini, che comprende 2 grandi sottordini: i Misticeti, cetacei dotati di fanoni, e gli Odontoceti, cetacei dotati di denti (Sayigh, 2013). Questi due sottordini sono distinti in 14 famiglie, per un totale di circa 92 specie (Braulik *et al.*, 2023). La maggior diversità di specie di cetacei è rappresentata dal sottordine degli Odontoceti, costituito da 10 famiglie e da circa 77 specie (Braulik *et al.*, 2023) (Tab. 1.1).

I Cetacei sono predatori apicali che trascorrono tutta la loro esistenza in acqua e utilizzano il suono per una serie di funzioni fondamentali per la loro vita, quali l'alimentazione, la comunicazione e la riproduzione (Braulik *et al.*, 2023). In ambiente acquatico la trasmissione e la propagazione del suono sono molto più efficienti rispetto a quelle della luce (Connor *et al.*, 1998). Infatti, il suono in acqua viaggia a una velocità circa cinque volte superiore a quella dell'aria (Vester *et al.*, 2017).

Tabella 1.1 - Tabella che illustra le famiglie e il relativo numero di specie appartenenti al sottordine degli odontoceti.

Sottordine	Famiglie	Numero di specie
Odontoceti	Physeteridae	1
	Kogiidae	2
	Ziphiidae	23
	Monodontidae	2
	Delphinidae	37
	Phocoenidae	7
	Platanistidae	2
	Iniidae	1
	Lipotidae	1
	Pontoporiidae	1

I suoni vengono prodotti attraverso un meccanismo pneumatico, simile a quello utilizzato dai mammiferi terrestri. Per quanto riguarda gli odontoceti, la generazione del suono avviene in un complesso sistema di sacche d'aria e tessuti che circondano la cavità nasale. Il suono viene prodotto grazie a due paia di "labbra foniche" (*Monkey Lips*, ML) poste poco al di sotto dello sfiatatoio, formate da due membrane, una anteriore e una posteriore, al centro delle quali è posta la "fessura fonica" (Fig. 1.1) (Cranford *et al.*, 2011).

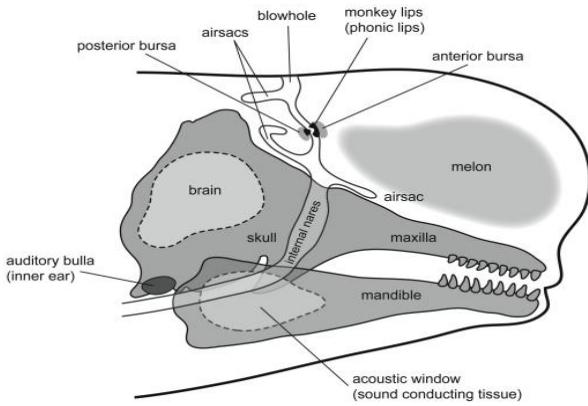


Figura 1.1 - Rappresentazione grafica del sistema di produzione di suoni del globicefalo (da: Nemiroff & Whitehead, 2009).

A livello istologico le ML sono formate da cellule estremamente piatte che si dispongono a strati; quelli più esterni sono in parte cheratinizzati. Queste strutture sono complessivamente ricche di desmosomi che donano alla struttura ulteriore rigidità (Prahl *et al.*, 2009). Dietro ciascuna ML si trovano dei corpi adiposi chiamati *Bursae Cantantes* o *Dorsal Bursae* (DB) (Cranford *et al.*, 2011), che insieme alle labbra foniche formano il complesso nasale *Monkey Lips/Dorsal Bursae* (MLDB) (Norris, 1968; Cranford *et al.*, 1996; Cranford & Amundin, 2004). Questo complesso è omologo in tutti gli odontoceti, variando solo nelle dimensioni e nella posizione (Cranford *et al.*, 1996). L'uso delle cavità nasali facilita la produzione di suoni complessi in profondità, laddove i suoni laringei sarebbero ostacolati dalla pressione (Madsen *et al.*, 2023). Ad eccezione dei capodogli (*Physeter macrocephalus*), che hanno una configurazione unilaterale, tutti gli altri odontoceti hanno una configurazione bilaterale con due complessi MLDB (ognuno associato a ciascuna delle due cavità nasali) ed entrambi sono utilizzati nella produzione del suono (Cranford *et al.*, 1996; Cranford & Amundin, 2004; Thomas *et al.*, 2004).

La fonazione avviene attraverso un procedimento pneumatico che coinvolge il complesso MLDB: i muscoli intercostali spingono l'aria fuori dai polmoni incanalandola nella laringe, la cui muscolatura genera un aumento della pressione che spinge a sua volta l'aria nelle cavità nasali (Reidenberg *et al.*, 2018) facendo vibrare il complesso MLDB e generando così i suoni (Cranford *et al.*, 2011; Reidenberg *et al.*, 2018). Durante questo processo lo sfiatatoio rimane chiuso; in questo modo, l'aria non viene espulsa, ma viene circolata all'interno dei sacchi aerei (ovvero espansioni delle narici) vestibolari, nasofrontali, accessori e premascellari. L'aria che arriva nei sacchi aerei ne genera l'espansione e questo processo crea un ciclo che permette di prolungare il flusso di aria che attraversa le ML, finché non si esaurisce il volume d'aria presente nei sacchi aerei. Questo ciclo permette all'animale di prolungare l'emissione dei suoni e di non disperdere aria nell'ambiente (Reidenberg *et al.*, 2018).

Le ML possono vibrare indipendentemente l'una dall'altra e non sono strettamente specializzate, ma è presente un'asimmetria dimensionale tra quelle di destra e quelle di sinistra che suggerisce la produzione anche simultanea di vocalizzazioni con caratteristiche di frequenza diverse (Filatova *et al.*, 2016). Nella maggior parte dei membri appartenenti alla famiglia dei Delphinidae, la coppia destra di labbra foniche è più grande di quella sinistra (Cranford *et al.*, 1996), ed è stato dimostrato come la produzione del click sia generalmente deputata alla parte destra, mentre la produzione del fischi principalemente alla parte sinistra (Madsen *et al.*, 2013). I delfinidi possono quindi produrre contemporaneamente click e fischi o anche due suoni tonali, dando origine a richiami "bifonici". Pertanto, la coppia di labbra foniche di destra che emette click è in grado di emettere anche suoni tonali (Murray *et al.*, 1998).

Nella maggior parte degli odontoceti, il complesso MLDB è in contatto diretto con il melone, un corpo adiposo formato da uno speciale grasso acustico e posto nella regione frontale del capo. Il melone svolge un ruolo fondamentale nel processo di emissione dei suoni, permettendo un'efficiente propagazione del segnale acustico nel mezzo acquatico (Au 2000). La parte più esterna del melone è composta da uno strato adiposo a maggiore densità, mentre quella più interna ha una densità minore che rallenta la velocità del suono facilitandone la propagazione e la focalizzazione (Arribart *et al.*, 2017; Koopman *et al.*, 2003). Questa particolare organizzazione dei grassi all'interno del melone gli conferisce caratteristiche di densità simile all'acqua, limitando i fenomeni di rifrazione e attenuazione che si verificano quando un'onda sonora attraversa due mezzi con densità differenti (Koopman *et al.*, 2003).

Come in tutti i mammiferi, la ricezione dei suoni avviene attraverso l'orecchio. I mammiferi marini hanno un numero maggiore di nervi uditivi, con un numero di fibre da due a tre volte superiore rispetto alle loro controparti terrestri (Ketten, 1997). L'apparato uditivo dei cetacei è molto simile a quello dei mammiferi terrestri, nonostante abbia subito alcune importanti trasformazioni anatomiche. Negli odontoceti l'orecchio esterno è totalmente assente e si presenta come un piccolo foro posizionato posteriormente all'occhio. La ricezione del suono e la sua trasmissione all'orecchio medio e all'orecchio interno, infatti, non avvengono attraverso il padiglione auricolare e il canale uditivo, ma attraverso la mandibola. I tessuti adiposi presenti nella regione mandibolare fungono da "finestra acustica" grazie alla presenza del grasso mandibolare (o grasso acustico), il quale è in grado di trasmettere molto efficacemente la vibrazione sonora attivando la bolla timpanica, l'area anatomica dove sono posizionati l'orecchio medio e l'orecchio interno. L'orecchio medio filtra e trasferisce l'energia acustica verso l'orecchio interno, il quale attiva il processo uditivo convertendo l'energia sonora in segnali neurali che vengono trasmessi al sistema nervoso centrale (Ketten 2000; Tyack 2000).

1.2 Caratteristiche e tipologie di suoni

Per adattarsi ad un ambiente caratterizzato da limitata visibilità come quello acquatico, gli odontoceti hanno sviluppato repertori vocali ampi e complessi che gli consentono di comunicare con i conspecifici attraverso il suono (Allen *et al.*, 2018; Jiang *et al.*, 2020; Cusano *et al.*, 2022). Gli odontoceti sono altamente vocali e si affidano al suono per svolgere diverse funzioni vitali; infatti, comunicano acusticamente durante le interazioni sociali, il foraggiamento, l'accoppiamento e l'allevamento dei piccoli (Courts *et al.*, 2020).

Il repertorio acustico degli odontoceti è stato descritto come complesso, in quanto caratterizzato da un'ampia gamma di suoni, i quali possono variare a livello di specie, popolazione o individuo (Courts *et al.*, 2020). La maggior parte degli odontoceti emette principalmente tre tipi di vocalizzazioni: click, suoni pulsati (*burst-pulsed sounds*) e fischi (*whistles*) (Erbe *et al.*, 2017). Non tutti gli odontoceti sono in grado di produrre tutte e tre le tipologie di questi suoni; il capodoglio ad esempio emette esclusivamente click (Dudzinski *et al.*, 2009). I click sono suoni impulsivi altamente direzionali, a banda larga (anche oltre 200 kHz), di durata inferiore a 1 ms ed elevata intensità, emessi tipicamente in sequenze di diversi secondi denominate "treni di click" (Ketten, 1992). I *burst-pulsed sounds* sono suoni impulsivi a banda larga composti da click prodotti in sequenza con un elevato tasso di ripetizione (*Pulse Repetition Rate*, PRR) ed un intervallo tra click successivi (*Inter-Click Interval*, ICI) inferiore a 5 μ sec (Schevill e Watkins 1966; Ford 1989). A causa dell'elevato PRR, sullo spettrogramma i suoni pulsati appaiono tipicamente come suoni modulati in frequenza con numerose bande laterali che sono correlate al tasso di ripetizione degli impulsi. Il PRR può sempre essere letto sullo spettrogramma come "intervallo armonico" (*Sideband Interval*, SBI) tra le frequenze delle bande laterali e la modulazione in frequenza del contorno del suono pulsato è legata alla sua variazione (Watkins, 1968). Inoltre, il tasso di emissione dei click così elevato fa sì che questi suoni siano percepiti come tonali all'orecchio umano (Ford 1989). Tra i *burst-pulsed sounds* si possono distinguere vari tipi di suoni, descritti in letteratura come *squawks*, *barks*, *pops*, *whine*, *blats*, *squeaks*, *moans* e *buzzes*, che hanno una funzione sociale (Schevill & Watkins 1966). Il "buzz", anch'esso ad alta frequenza e con un elevato tasso di ripetizione, è utilizzato per l'alimentazione (Lammers *et al.*, 2004; Madsen & Wahlberg, 2007). Una particolare tipologia di *burst-pulsed sound* è rappresentata dalle *pulsed calls*, suoni pulsati con una probabile funzione comunicativa, interessanti per la loro complessa struttura fisica e la loro natura dinamica (Nemiroff, 2009). Molti odontoceti producono *pulsed calls*, tra cui i beluga (*Delphinapterus leucas*) (Karlsen *et al.*, 2002), i narvali (*Monodon monoceros*) (Ford & Fisher, 1978), le pseudorche (*Pseudorca crassidens*) (Murray *et al.*, 1998) e le orche (*Orcinus orca*) (Ford & Fisher 1983).

I suoni pulsati più accuratamente descritti sono quelli delle orche al largo della Columbia Britannica e rappresentano la classe più abbondante e caratteristica di vocalizzazioni prodotte da questa specie (Ford, 1989). Questi suoni possono avere una struttura semplice, costituita da un unico elemento acustico, oppure una struttura più complessa o “multicomponente”, ovvero caratterizzata dalla presenza simultanea di due o più elementi acustici con differenti profili di frequenza (Wellard *et al.*, 2020). Vocalizzazioni di questo tipo possono essere esclusivamente di tipo pulsato (Fig. 1.2) oppure essere caratterizzate da una componente a frequenza più alta (*Upper/High Frequency Component*, UFC/HFC) di tipo tonale assimilabile ad un fischio, e da una componente a frequenza più bassa (*Lower Frequency Component*, LFC) di tipo pulsato (Wellard *et al.*, 2020) (Fig. 1.3). Le *Pulsed calls* che posseggono sia HFC che LFC sono un esempio di bifonia (Nemiroff & Whitehead, 2009), che consiste nella produzione simultanea di due suoni distinti (Aplan *et al.*, 2018; Quick *et al.*, 2018). Queste possono essere difficili da distinguere l'una dall'altra, con frequenze che dai 140 Hz possono superare i 20 kHz (Nemiroff & Whitehead 2009).

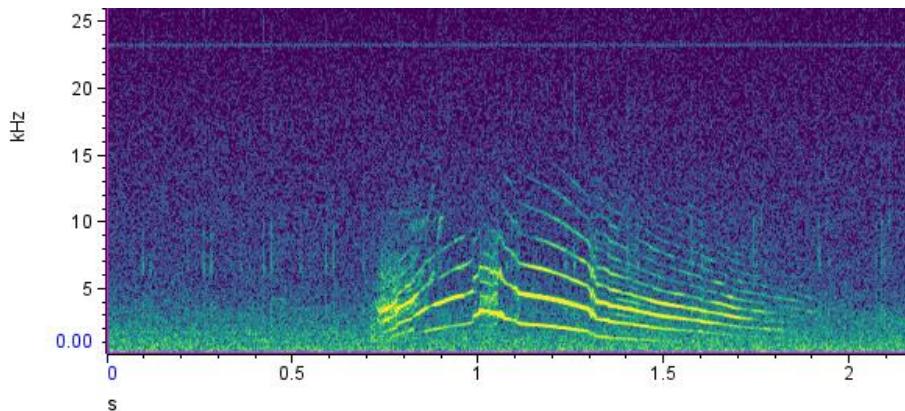


Figura 35.2 - Spettrogramma di un suono pulsato di globicefalo identificato nel presente studio (Hann window, FFT 1024, 3 dB Filter Bandwidth: 135 Hz, Overlap 90%, Hop Size: 102).

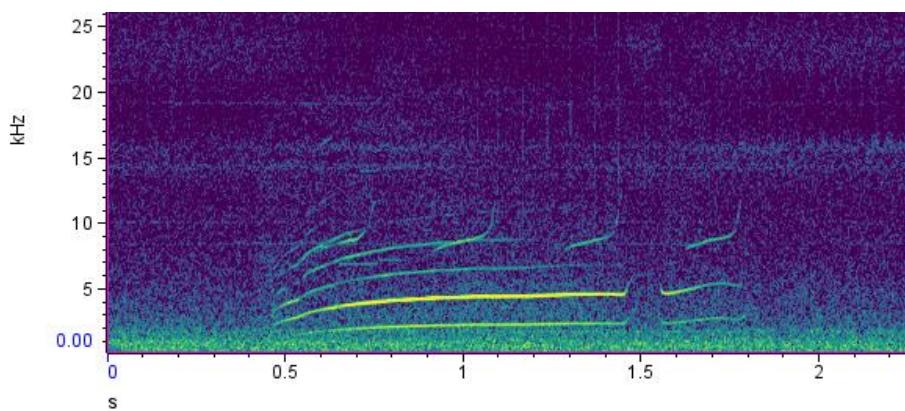


Figura 1.3 - Spettrogramma di un suono pulsato di globicefalo identificato nel presente studio caratterizzato da una componente a frequenza più alta (High Frequency Component, HFC) e da una componente a frequenza più bassa (Lower Frequency Component, LFC) (Hann window, FFT 1024, 3 dB Filter Bandwidth: 135 Hz, Overlap 90%, Hop Size: 102).

I suoni pulsati di solito contengono variazioni brusche e modulate della frequenza degli impulsi, che danno origine a un'ampia varietà di richiami distintivi (Ford, 1989). In particolare, nelle orche sono state riconosciute tre tipologie di *pulsed calls*: discrete, variabili e aberranti (Ford, 1989). I suoni pulsati discreti possiedono proprietà strutturali distinctive e ripetitive; diverse tipologie di questi suoni, o *call type*, possono essere generalmente distinte dal punto di vista uditivo (Ford, 1989). I suoni pulsati sono considerati variabili quando non possono essere organizzati in categorie strutturali chiaramente definite e non sono ripetitivi; questi hanno una grande varietà di forme, che vanno da brevi *squeaks* a lunghi e rauchi *squawks* (Ford 1989). I suoni pulsati aberranti, relativamente poco comuni, sono basati su una struttura di un suono discreto, ma questa risulta altamente modificata o distorta (Ford, 1989).

I fischi sono suoni tonali di almeno 0.1 secondi, continui e a banda stretta, costituiti da un contorno modulato in frequenza, che spesso presentano una struttura armonica formata dalla frequenza fondamentale sopra i 3 kHz e i suoi multipli interi (Kriesell *et al.*, 2014). Una particolare tipologia di fischi, detti fischi firma (*Signature Whistles*), rappresenta una parte consistente del repertorio vocale di molte specie di odontoceti (Sayigh, 2013). Queste vocalizzazioni sono identificative dell'individuo che le emette, sono stereotipate e stabili nel tempo (Sayigh *et al.*, 1999), e hanno un ruolo fondamentale nel riconoscimento individuale e nel mantenimento della coesione del gruppo (Janik e Slater 1998). Il tursiope (*Tursiops truncatus*) è stato al centro di studi che hanno documentato la presenza di questi suoni, sebbene questi segnali siano stati riconosciuti anche in altre specie di delfinidi (Sayigh 2013).

Non tutti i suoni prodotti dagli odontoceti rientrano in queste classi distinte. Ad esempio, le orche, così come le pseudorche, producono tipologie di suoni graduati che si collocano lungo un continuum che va dai fischi ai suoni pulsati (Murray *et al.*, 1998).

1.3 Funzioni

Le tipologie di suoni utilizzate dagli odontoceti rivestono un ruolo importante nelle attività vitali utili alla sopravvivenza individuale e della popolazione (Burnham & Duffus, 2023).

La comunicazione acustica, che si basa sulla percezione e sull'interpretazione dei suoni, aiuta a coordinare il comportamento e mantenere la coesione nel gruppo, permette la definizione e la difesa del territorio, le cure parentali, l'individuazione delle prede, la selezione dei partner e la fuga dai pericoli (Burnham & Duffus, 2023). I segnali acustici possono contenere informazioni sulla specie, con differenze geografiche, sul sesso, sulla propria identità e sullo stato riproduttivo degli individui (Vester *et al.*, 2017; Tyack, 2000).

Dato il comportamento altamente sociale di molti cetacei, lo studio della comunicazione acustica è essenziale per comprendere il ruolo che svolge nella regolazione delle interazioni sociali di queste specie (Dudzinski *et al.*, 2009). Per i cetacei, la modalità di comunicazione di una specie è spesso strettamente legata alla sua struttura sociale (Tyack, 1986). Gli odontoceti presentano alcune delle più complesse strutture sociali, che sono caratterizzate da diverse tipologie di gruppi più o meno stabili nel tempo (Trillmich & Cantor, 2018). Vocalizzazioni specifiche individuali si trovano tipicamente in specie che mantengono legami sociali tra individui all'interno di gruppi instabili (Tyack, 1986, 2000). Una struttura di questo tipo si incontra nei tursiopi (*Tursiops* sp.), che si trovano in gruppi fino a 100 individui e sono organizzati in strutture di tipo *fission-fusion*, con gruppi sociali che variano nel tempo in composizione e dimensioni (Connor *et al.*, 2000). Al contrario, nelle specie in cui gli individui si trovano in unità sociali stabili, è probabilmente più importante che un individuo riconosca e rimanga in contatto con il suo gruppo piuttosto che con un particolare individuo al suo interno (Tyack, 1986, 2000). Le orche e i capodogli, ad esempio, sono organizzati in società gerarchiche matrilineari stabili e utilizzano repertori vocali specifici e identificativi del gruppo (Bigg *et al.*, 1990). Per le specie che non hanno legami stabili sia individuali che di gruppo, la comunicazione assume spesso la forma di segnali detti di "*advertisement*", che sono finalizzati all'immissione di un segnale nell'ambiente piuttosto che alla comunicazione tra individui (Tyack, 1986, 2000). I segnali acustici sono strumenti essenziali per le interazioni tra gli individui e l'interpretazione della loro funzione specifica si basa su elementi quali: il periodo (stagione), il livello di associazione e di vicinanza degli individui nel gruppo o allo stato comportamentale, emotivo o fisiologico concomitante alla vocalizzazione (Burnham & Duffus, 2023). Piccole variazioni nella struttura di un segnale possono riflettere piccole gradazioni di uno stato emotivo, soprattutto se utilizzate simultaneamente a display visivi (Ford, 1989).

I click sono utilizzati principalmente per l'ecolocalizzazione durante la navigazione e il foraggiamento (Au, 1993). Tutte le specie di odontoceti ecolocalizzano, anche se le caratteristiche dei loro segnali di ecolocalizzazione variano notevolmente. L'ecolocalizzazione funziona come un vero e proprio sonar naturale: l'animale emette i click frontalmente nell'ambiente e questi vengono riflessi quando incontrano un ostacolo, generando un eco di ritorno che consente all'animale di identificare la posizione nello spazio di oggetti e prede (Ketten, 1992; Jones, 2005; Reidenberg *et al.*, 2018). Questo gli permette di investigare l'ambiente e di costruire un paesaggio sonoro per orientarsi nel buio, acquisendo le informazioni sull'ambiente circostante (Au, 1993).

Nella fase di caccia che precede la cattura della preda solitamente il tasso di ripetizione dei click aumenta fino a 500 al secondo formando i *buzzes*, fondamentali per l'inseguimento e la cattura attiva della preda (Madsen *et al.*, 2023). La presenza dei *buzzes* indica che l'individuo sta focalizzando acusticamente la preda (Wang *et al.*, 2022) e le loro caratteristiche variano

generalmente in funzione della distanza dalla preda e delle dimensioni della stessa (Sarnocińska *et al.*, 2020). Negli ultimi anni, la loro funzione si è estesa anche all'ambito sociale; vengono infatti utilizzati non solo durante il foraggiamento, ma anche durante attività quali il corteggiamento e l'allevamento dei piccoli (Herzing & dos Santos, 2004; Herzing, 2004; Martin *et al.*, 2019).

Per quanto riguarda i suoni pulsati e i fischi, si ritiene che entrambi siano segnali comunicativi utilizzati in contesti sociali, che funzionano come segnali di contatto nel coordinamento del comportamento e nell'identificazione del gruppo ed entrambi differiscono a livello di specie, di popolazione e talvolta di individuo (Ford 1989; Dudzinski *et al.*, 2009). I suoni pulsati sono generalmente considerati dei segnali funzionali alla comunicazione intraspecifica (Lammers *et al.*, 2004; Yoshida *et al.*, 2014; Martin *et al.*, 2018; Sørensen *et al.*, 2018). La relativa facilità con cui i suoni pulsati possono essere identificati, la loro variabilità e l'intensità con cui possono essere prodotti ne aumentano il valore potenziale come segnali di comunicazione (Dudzinski *et al.*, 2009). In situazioni descritte come allarme, spavento o angoscia, sono stati registrati per tursiope e focena (*Phocoena phocoena*) squeaks a banda larga ad alta intensità. I delfini di fiume della famiglia Platanistidae, alcuni membri della famiglia Delphinidae (come le orche), nonché Physeteridae e Phocoenidae, comunicano probabilmente attraverso i suoni pulsati (Dudzinski *et al.*, 2009). Inoltre, è stato dimostrato come questi suoni siano utilizzati per il riconoscimento tra conspecifici e svolgano un ruolo in specifiche manifestazioni comportamentali, come il corteggiamento, l'aggressività e altre attività sociali di relativa eccitazione (Herzing 1996; Mishima *et al.*, 2015). Si ipotizza che i suoni pulsati discreti sono comunemente associati alla comunicazione a distanza tra conspecifici, mentre i segnali acustici con strutture altamente variabili o graduate tendono a essere associati a contesti sociali che prevedono la vicinanza dei membri del gruppo (Ford 1989). Questa ipotesi potrebbe trovare una spiegazione nel fatto che a distanze ravvicinate è possibile un contatto visivo o fisico, e quindi non vi è la necessità di un'identificazione univoca dei segnali acustici (Ford 1989). Inoltre, l'utilizzo di segnali graduali è spesso associato a interazioni affiliative in molte specie, che possono essere importanti per riaffermare le relazioni all'interno dei gruppi sociali dopo periodi di dispersione o separazione (Smith *et al.*, 1982).

I fischi sono utilizzati per il riconoscimento tra conspecifici e come richiami di contatto per la coordinazione e la coesione degli individui all'interno delle loro unità sociali durante attività quali il foraggiamento o i movimenti (Jones *et al.*, 2020; Sayigh *et al.*, 2007; Herzing, 2014). I fischi firma, in particolare, svolgono un ruolo centrale anche in attività di cooperazione, come quella che si svolge nella baia di Shark Bay, in Australia occidentale (King *et al.*, 2021). I maschi di *Tursiops aduncus*, tursiopi indopacifici, cooperano in alleanze per cercare di radunare le femmine per la riproduzione e in questa complessa rete sociale ciascun individuo mantiene il proprio fisichio distintivo (King *et al.*, 2021). Il riconoscimento

dei fischi firma degli alleati permette una forte coordinazione e sincronizzazione tra gli individui, qualcosa che attualmente non è noto in nessun altro animale non umano (King *et al.*, 2021).

In molte specie i click di ecolocalizzazione costituiscono la totalità o la parte principale del loro repertorio vocale (Thomas *et al.*, 2004). Alcuni odontoceti, quindi, utilizzano i click anche per comunicare tra loro (Dawson, 1991; Weilgart & Whitehead, 1993). Il capodoglio, ad esempio, utilizza arrangiamenti di click specifici e differenti per assolvere compiti diversi, come la navigazione, l'orientamento, la comunicazione e l'eco-localizzazione (Whitehead, 2003). Tra gli odontoceti, segnali specifici di gruppo e/o individuali sono presenti in alcune delle specie più sociali, come alcuni delfinidi. Queste tipologie di segnali servono a mantenere stabili le relazioni sociali (Sayigh, 2013). I richiami stereotipati prodotti dai membri di un gruppo sociale che variano tra le popolazioni di una stessa specie sono stati definiti dialetti acustici e sono stati descritti in almeno due specie di odontoceti (Dudzinski *et al.*, 2009). Ad esempio, al largo della Columbia Britannica, i gruppi matrilineari di orche presentano repertori acustici caratterizzati da richiami unici per ogni *pod* (Dudzinski *et al.*, 2009). I dialetti delle orche sono stati studiati in dettaglio in diverse popolazioni del Pacifico settentrionale e sono state documentate vocalizzazioni specie-specifiche (Filatova *et al.*, 2012). La trasmissione culturale del repertorio vocale delle orche ha portato alla formazione di dialetti tra gruppi vicini in alcune popolazioni e alla variazione geografica tra popolazioni lontane (Deecke *et al.*, 2000). Anche nei capodogli è stata documentata la presenza di dialetti, ovvero di arrangiamenti di click chiamati *cadas* che sono specifici delle varie popolazioni nelle varie regioni nel mondo (Watkins e Schevill, 1977). I *cadas* si presentano arrangiati in diversi pattern con intervalli temporali variabili e hanno una funzione sociale (Watkins e Schevill, 1977). Come i dialetti delle orche, i *cadas* potrebbero essere il risultato di una trasmissione culturale (Dudzinski *et al.*, 2009).

Capitolo 2 - IL GLOBICEFALO (*Globicephala melas*)

2.1 Biologia ed ecologia

Il globicefalo, *Globicephala melas* (Traill 1809) (Fig. 2.1), è un cetaceo odontocete appartenente alla famiglia dei Delphinidae (Olson, 2018) (Tab. 2.1).



Figura 2.1 - Il Globicefalo (*Globicephala melas*), foto ©Istituto Tethys Onlus.

Tabella 2.1 - Tassonomia di globicefalo (*G. melas*)

Regno	Animalia
Phylum	Chordata
Subphylum	Vertebrata
Classe	Mammalia
Ordine	Cetacea
Sottordine	Odontoceti
Famiglia	Delphinidae
Genere	<i>Globicephala</i>
Specie	<i>Globicephala melas</i>

Del genere *Globicephala* vengono riconosciute due specie: *G. melas*, più grande e con le pinne pettorali particolarmente lunghe, e il globicefalo di Gray, *G. macrorhynchus*, di dimensioni minori. La specie *G. melas* presenta due sottospecie, *G. melas melas*, presente nelle acque nord Atlantiche e Mediterranee, e *G. melas edwardii*, presente nell'emisfero australe e nelle acque sub-antartiche. Le due popolazioni sono apparentemente disgiunte e sembrano mantenere un basso flusso genico testimoniato da una bassa affinità a livello dei geni mitocondriali

(Minton *et al.*, 2018). Il nome del genere, *Globicephala*, significa "testa rotonda", che è una delle principali caratteristiche identificative di questo mammifero marino, mentre *melas* deriva dal greco e significa "nero", che sta ad indicare la colorazione (Olson, 2009). Complessivamente il globicefalo presenta una forma del corpo affusolata, con delle pinne pettorali lunghe, sottili e a forma di falce, caratteristica morfologica che viene ripresa dal nome comune anglosassone "*Long-finned pilot whale*".

Il globicefalo è il secondo delfinide più grande esistente dopo l'orca (Olson, 2018) e presenta un notevole dimorfismo sessuale, soprattutto nelle dimensioni, simile a quello osservato nelle orche. I maschi, infatti, possono raggiungere 6,5 metri di lunghezza e 2 tonnellate di peso, mentre le femmine sono più piccole e non superano i 5,5 metri e 1 tonnellata di peso (Vester *et al.*, 2017). La specie *G. m. melas* condivide diverse caratteristiche del ciclo vitale con altri grandi odontoceti: lunga durata della vita, maturità ritardata, tassi di maturazione diversi per maschi e femmine, accoppiamento stagionale e produzione di un unico cucciolo in intervalli pluriennali (Olson, 2009). Le femmine raggiungono la maturità sessuale intorno agli 8 anni mentre i maschi verso i 12 anni. Il parto avviene ogni 3-5 anni dopo una gestazione di 12-15 mesi e le cure parentali durano circa 2 anni (Olson and Reilly, 2002). Le femmine sono notoriamente più longeve; vivono fino ai 60 anni, mentre i maschi raggiungono i 35-45 anni (Ross, 2006).

Il globicefalo è un predatore apicale e ricopre un ruolo importante nella rete trofica e nelle sue dinamiche (Becker *et al.*, 2021). È una specie "*deep diver*", ovvero in grado di immergersi a grandi profondità per raggiungere le prede di cui si nutre (Spitz *et al.*, 2011). Gli habitat preferiti dai globicefali sono generalmente più profondi di 500 m (range 207-1.800 m), al largo della piattaforma continentale e delle scarpate (Gauffier *et al.*, 2021). In Mediterraneo centrale e nord-occidentale, prediligono habitat profondi con una media di 2.000 m (Gauffier *et al.*, 2021). I globicefali sono principalmente teutofaghi, cioè si nutrono prevalentemente di cefalopodi (Olson, 2009). Nel Mediterraneo si nutrono principalmente di specie di cefalopodi quali *Ancistroteuthis lichtensteini*, *Heteroteuthis dispar*, *Histioteuthis bonnellii*, *H. elongata*, *H. reversa*, *Todarodes sagittatus* e dei cefalopodi appartenenti alle famiglie di Chiroteuthidae, Octopoteuthidae e Ommastrephidae (Gauffier *et al.*, 2021). Le immersioni per foraggiarsi avvengono principalmente di notte, quando la disponibilità di prede è maggiore a causa dello spostamento verso la superficie dello strato riflettente profondo; sembra che i globicefali approfittino di questa situazione durante le notti invernali più lunghe per foraggiare per più ore (Giorli *et al.*, 2016). La modalità con la quale il globicefalo preda è un sistema di suzione, attuato grazie ad un aumento del volume orale per mezzo della retrazione della lingua che causa una diminuzione della pressione nella bocca dell'animale, andando così a richiamare acqua dall'esterno e, con essa, anche la preda (Werth, 2000).

2.2 Struttura sociale

I globicefali sono animali altamente sociali e, come le orche e i capodogli, formano gruppi matrilineari stabili nel tempo (Nemiroff & Whitehead, 2009). La struttura sociale di questa specie gregaria viene descritta come un sistema gerarchico basato su unità matrilineari che possono occasionalmente riunirsi a formare gruppi o “*pod*”, che a loro volta possono riunirsi a formare un “*clan*” (de Stephanis *et al.*, 2008). L’unione di tutti i *clan* presenti in una specifica area forma una popolazione (de Stephanis *et al.*, 2008).

Le unità matrilineari sono costituite dalle femmine adulte, che rimangono insieme per l’intera durata della propria vita, e dalla loro prole (Amos *et al.*, 1993). Gli individui delle unità sono di entrambi i sessi, ma la tipologia del loro legame non è chiara; si ipotizza che possano essere delle coppie riproduttive stabili oppure, più probabilmente, associazioni madre-figlio (de Stephanis *et al.*, 2008). Le unità sono composte da un numero di individui che varia in base alla popolazione: nello stretto di Gibilterra, ad esempio, si osservano unità formate in media da 14 individui (de Stephanis *et al.*, 2008), mentre nel bacino del Mediterraneo nord-occidentale la media è di circa 20-25 individui, molto più grande che in altre parti del Mediterraneo (Gauffier *et al.*, 2021). La struttura sociale dei *pod* dei globicefali è simile a quella delle orche (Olson & Reilly, 2002). In Mediterraneo la grandezza dei gruppi varia da 10 a 50 individui (Fig. 2.2) (Verborgh *et al.*, 2016). Questa variabilità deriva probabilmente dall’unione di diverse unità in *pod*, come avviene ad esempio nello stretto di Gibilterra, dove si osserva un aumento delle dimensioni dei gruppi durante la primavera, probabilmente a scopo riproduttivo, oppure per un cambiamento stagionale della dieta (de Stephanis *et al.*, 2008).



Figura 2.2 - Gruppo di globicefali fotografato nel Mar Ligure nordoccidentale, foto ©Istituto Tethys Onlus.

L'accoppiamento avviene probabilmente quando due o più unità si uniscono per formare gruppi temporanei più grandi o quando un maschio fa brevi visite ad altre unità; infatti, i maschi adulti raramente sono i padri dei piccoli che si trovano all'interno del loro gruppo (Amos *et al.*, 1993). Il globicefalo, insieme alle orche e ai tursiopi, è una delle poche specie in cui né la prole maschile né quella femminile si disperdono dal gruppo natale, anche dopo aver raggiunto la maturità sessuale (Nemiroff & Whitehead, 2009). Questo comportamento è raro nei mammiferi e si è osservato nelle orche residenti lungo la costa occidentale del Canada e degli Stati Uniti settentrionali (Bigg *et al.*, 1990). Secondo Connor (2000), questa tendenza a rimanere nel gruppo natale potrebbe essere un meccanismo per evitare i costi di mortalità associati alla dispersione, che potrebbero essere elevati per gli individui giovani soggetti alla predazione (Connor 2000). Inoltre, sia i maschi che le femmine potrebbero trarre vantaggio dalla cooperazione con i conspecifici e i familiari all'interno dell'areale natale (Connor 2000).

Il forte livello di coesione sociale all'interno dei gruppi rende i globicefali vulnerabili agli spiaggiamenti di massa (che può coinvolgere decine e centinaia di individui) e alle attività di pesca (Olson, 2009).

2.3 Repertorio acustico

I globicefali sono mammiferi estremamente vocali e utilizzano una combinazione di click, fischi e suoni pulsati per comunicare e interagire con il proprio ambiente (Fig. 2.3) (Taruski 1979, Weilgart e Whitehead 1990). Il repertorio acustico di questa specie è stato descritto come molto vario, ripetitivo e fisicamente complesso (Courts *et al.*, 2020; Nemiroff & Whitehead, 2009; Vester *et al.*, 2017).

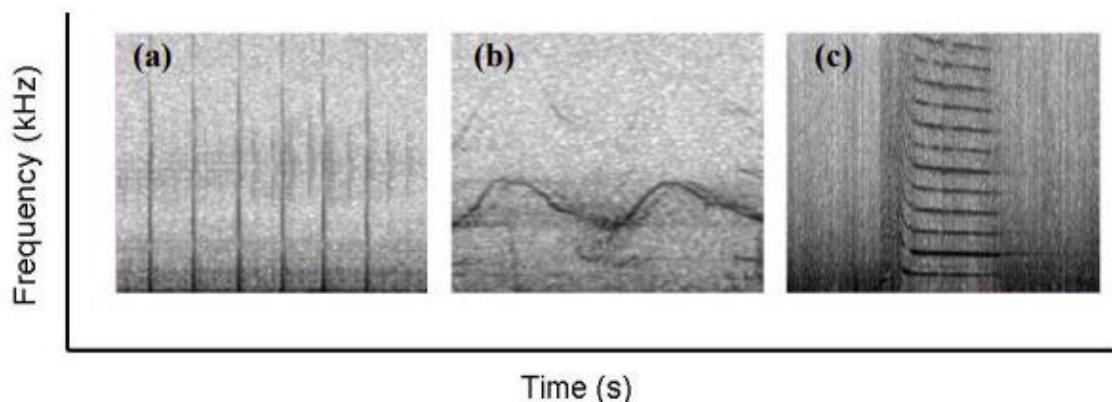


Figura 2.3 - Spettrogrammi che mostrano le tre tipologie di vocalizzazioni prodotte dal globicefalo. (a) click, (b) un fischi e (c) un suono pulsato (da: Nemiroff 2009).

I click di globicefalo, utilizzati per l'ecolocalizzazione, occasionalmente risultano composti da doppi click, caratteristica osservata anche nelle orche (Busnel *et al.*, 1971, Ford 1989). I fischi hanno frequenze che variano generalmente tra 0.5 kHz e 5 kHz e sono estremamente variabili nella forma. Un aspetto interessante di questi suoni è che durante l'emissione ripetuta dello stesso fischio, il suo contorno può subire modifiche, partendo da una forma più semplice, passando per una complessità intermedia fino ad arrivare ad una forma più complessa (Taruski, 1979). La natura graduale di un suono può consentirgli di avere più funzioni e può comunicare il livello di eccitazione o lo stato comportamentale dell'individuo (Taruski, 1979). Inoltre, sulla base del livello di modulazione in frequenza del contorno, è possibile dividere i fischi in "semplici", con un contorno poco modulato, ascendente o discendente, e "complessi" che invece possono essere estremamente modulati, con diverse inflessioni (Taruski, 1979). Confrontando i fischi di globicefalo con quelli di altre specie di odontoceti, si è osservato come questi suoni abbiano delle caratteristiche specie-specifiche che li distinguono da quelli di altre specie e che la diversità è correlata alle relazioni tassonomiche e zoogeografiche tra le specie (Steiner, 1981); le specie congeneriche producono vocalizzazioni più simili rispetto a specie di generi diversi e le differenze tra specie simpatriche sono maggiori di quelle tra specie allopatiche (Rendell *et al.*, 1999).

Le *pulsed calls* (Fig. 2.4) sono suoni acusticamente e strutturalmente molto simili a quelle presenti nel repertorio vocale delle orche (Filatova *et al.*, 2009).

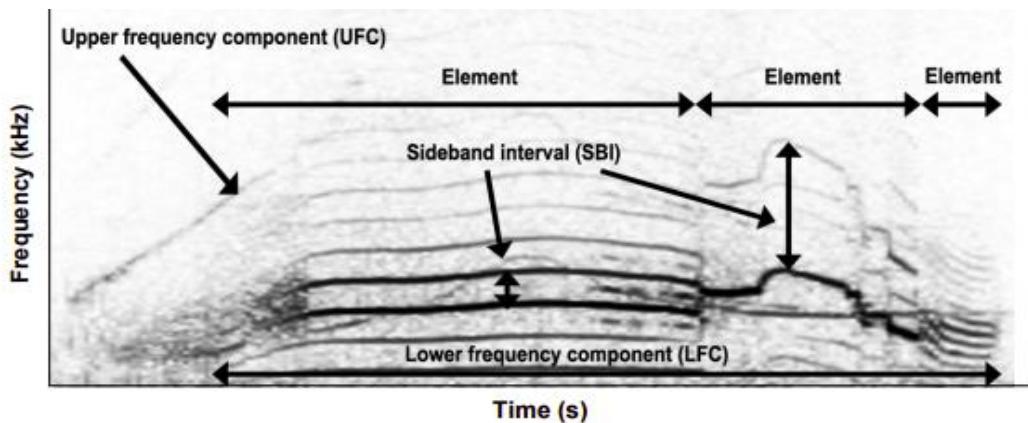


Figura 2.4 - Spettrogramma che mostra la struttura di una *pulsed call* prodotta dal globicefalo (da: Nemiroff 2009). Parametri: Element: elemento; Upper frequency component (UFC): componente a frequenza più alta; Lower frequency component (LFC): componente a frequenza più bassa; Sideband interval (SBI): intervallo di banda.

Dalla letteratura si evince che le *pulsed calls* prodotte da questa specie variano in frequenza da circa 200 Hz a 25 kHz e da 0.03 s a 2.07 s in durata (Courts *et al.*, 2020). Possono presentarsi suddivise in "elementi", ovvero in parti separate da bruschi cambiamenti della frequenza di ripetizione degli impulsi e questa suddivisione si riflette nella variazione dell'intervallo armonico tra le frequenze delle bande laterali (Nemiroff, 2009).

Inoltre, all'interno di una *pulsed call* ci possono essere degli intervalli di silenzio che permettono una suddivisione in "segmenti" del suono (Yurk, 2005); in media è stato osservato come questo silenzio duri 0.089 secondi (Nemiroff, 2009).

Uno studio effettuato lungo la costa meridionale dell'Australia continentale ha documentato la presenza di vocalizzazioni stereotipate, vocalizzazioni graduate, molte bifonie e vocalizzazioni multicomponente nel repertorio di questa specie (Courts *et al.*, 2020). La presenza di suoni pulsati bifonici e monofonici all'interno della stessa popolazione suggerisce una possibile funzione comunicativa della componente ad alta frequenza (*High Frequency Component*, HFC) (Nemiroff 2009). Uno studio condotto sulle orche nel Pacifico nordorientale ha dimostrato che il loro repertorio vocale può essere suddiviso in suoni pulsati "a lungo raggio" con componenti ad alta frequenza sovrapposte (equivalenti agli HFC) e suoni "a corto raggio", tra cui fischi e suoni pulsati senza HFC (Miller 2006). La trasmissione a più lungo raggio può avere funzioni intergruppo, come l'attrazione del compagno, necessaria per ridurre i potenziali costi di consanguineità, o la competizione spaziale, o funzioni intragruppo, come il mantenimento della coesione del gruppo durante il foraggiamento (Ford 1989; Weilgart & Whitehead 1990). La trasmissione di informazioni a corto raggio, invece, può avere un ruolo fondamentale nel mantenere e rafforzare i legami a lungo termine all'interno di un'unità sociale (Nemiroff 2009). La presenza di due componenti modulate in modo indipendente all'interno di un suono potrebbe consentire ai mittenti di trasmettere molteplici informazioni, tra cui l'identità, lo status e la condizione ai potenziali compagni (Hebets e Papaj 2005; Yurk 2005). Inoltre, si è ipotizzato che la combinazione di più componenti, probabilmente ricche di informazioni e difficili da imitare, potrebbe aumentare la probabilità di riconoscimento della vocalizzazione, fondamentale per la comunicazione a lunga distanza in ambienti rumorosi (Nemiroff & Whitehead, 2009; Filatova *et al.*, 2009).

Molte di queste vocalizzazioni sono state prodotte in sequenze ripetute (Zwamborn & Whitehead, 2017). Le ragioni di questa ripetitività sono attualmente sconosciute, ma la ripetitività potrebbe favorire la comunicazione in ambienti rumorosi o mantenere la coesione del gruppo (Nemiroff & Whitehead, 2009; Zwamborn & Whitehead, 2017). È stato anche ipotizzato che le vocalizzazioni complesse si siano evolute per assolvere a più funzioni (Bradbury & Vehrencamp, 1998) e che possano trasmettere più informazioni contemporaneamente (Hebets & Papaj, 2005).

È stato osservato che la struttura dei suoni pulsati sembra dipendere dalle unità sociali che li producono e può quindi riflettere l'appartenenza all'unità (Nemiroff, 2009). È emerso anche che alcuni *pod* producono suoni pulsati con una struttura simile, diversi da quelli prodotti da altri gruppi, il che potrebbe indicare la presenza di clan vocali più ampi che condividono aspetti del loro repertorio vocale (Nemiroff, 2009).

Sembra esistere una forte relazione tra la struttura delle vocalizzazioni e il comportamento (Weilgart & Whitehead 1990; Nemiroff, 2009), avallando l'ipotesi che i suoni svolgono una funzione nel mantenere la coesione del gruppo e di trasmettere informazioni durante le interazioni sociali. Sia i fischi che i suoni pulsati presentano una maggiore complessità quando i globicefali mostrano comportamenti attivi in superficie, come il *breaching* (Weilgart & Whitehead, 1990).

2.4 Distribuzione e minacce

Il globicefalo è presente in entrambi gli emisferi con una distribuzione anti-tropicale, prediligendo le regioni temperate e sub-polari (Minton *et al.*, 2018). Nonostante si concentri maggiormente negli ambienti pelagici, in aree con una profondità uguale o superiore a 2000 m, può anche essere incontrato in prossimità della piattaforma continentale (Olson, 2009). Nell'emisfero settentrionale, la specie *G. melas melas* è presente in Nord Atlantico, nelle acque della Groenlandia, dell'Islanda e del Mare di Barents a sud del Tropico del Cancro, e nel Mar Mediterraneo. Nell'emisfero australe, l'areale di *G. melas edwardii* si estende dalla convergenza Antartica fino al 30° S (Olson *et al.*, 2018). Sebbene non sia presente attualmente in Nord Pacifico, evidenze fossili trovate in Giappone testimoniano la sua presenza in passato; l'altra specie di globicefalo, *Globicephala macrorhynchus*, abita ora queste acque (Olson, 2009).

Attualmente non è disponibile una stima complessiva dell'abbondanza della popolazione mondiale, ma grazie agli avvistamenti effettuati durante 4 surveys (Small Cetaceans in the European Atlantic and North Sea - SCANS-II, Cetacean Offshore Distribution and Abundance in the European Atlantic - CODA, e Trans North Atlantic Sightings Survey - TNASS) condotti tra il 2005 e il 2007 in Nord Atlantico, è stata stimata una popolazione di circa 152.071 esemplari (Rogan *et al.*, 2017). Per l'Emisfero Australe invece, nonostante siano frequenti gli spiaggiamenti in Australia e Nuova Zelanda, non ci sono dati sufficienti per una stima della popolazione (Minton *et al.*, 2018).

Per quanto riguarda il Mar Mediterraneo, i dati sulla dimensione della popolazione, geneticamente isolata dal Nord Atlantico, hanno prodotto una stima totale di 5.540 esemplari (ACCOBAMS, 2021). La presenza della specie *G. m. melas* nel Mediterraneo è limitata alla porzione occidentale del bacino e si divide in due sottopopolazioni geneticamente differenti (Fig. 2.5): una si trova nello stretto di Gibilterra e classificata come a rischio critico di estinzione, “*Critically Endangered*”, secondo la Lista Rossa della IUCN - Unione Internazionale per la Conservazione della Natura (Verborgh *et al.*, 2021), e l'altra nella zona Nord-occidentale del bacino, classificata come a rischio di estinzione, “*Endangered*” (Gauffier *et al.*, 2021). La prima si estende dallo stretto di Gibilterra fino ad

Ovest del Mare di Alborán ed ha una maggior densità di globicefali, che sono presenti tutto l'anno (ACCOBAMS, 2021). La popolazione del bacino nord-occidentale si estende dalla parte est del Mare di Alborán fino al Mar Ligure (Gauffier *et al.*, 2021) e in quest'area la specie è presente con minor frequenza (ACCOBAMS, 2021). La sottopolazione mediterranea contiene meno di 2.500 individui maturi (Gauffier *et al.*, 2021). Nel 2011-2012 in quest'area è stata stimata la presenza di circa 300-600 individui, basata su otto *survey* aerei (Laran *et al.*, 2017), mentre nel Mar Ligure tra il 1991 e il 2010 è stata stimata una dimensione minima della popolazione di 184 individui (Greco 2011), confermando la bassa abbondanza di questa specie nell'area (ACCOBAMS, 2021).

La sottopolazione di Gibilterra si avvista generalmente in acque meno profonde, circa 500 m, rispetto alla popolazione nord-occidentale che generalmente si incontra in aree con una profondità uguale o superiore a 2000 m (Verborgh *et al.*, 2016). A partire dall'inverno 2006-2007, nello stretto di Gibilterra la specie ha subito una diminuzione della popolazione di oltre il 10% a causa di un'epizoozia di morbillivirus (ACCOBAMS, 2021). Negli ultimi 50 anni, la presenza di globicefali è diminuita drasticamente anche nel Mar Ligure e nel Mar Tirreno, passando da frequenti incontri annuali di *pod* molto grandi negli anni '70 a pochissimi gruppi ogni estate (ACCOBAMS, 2021).

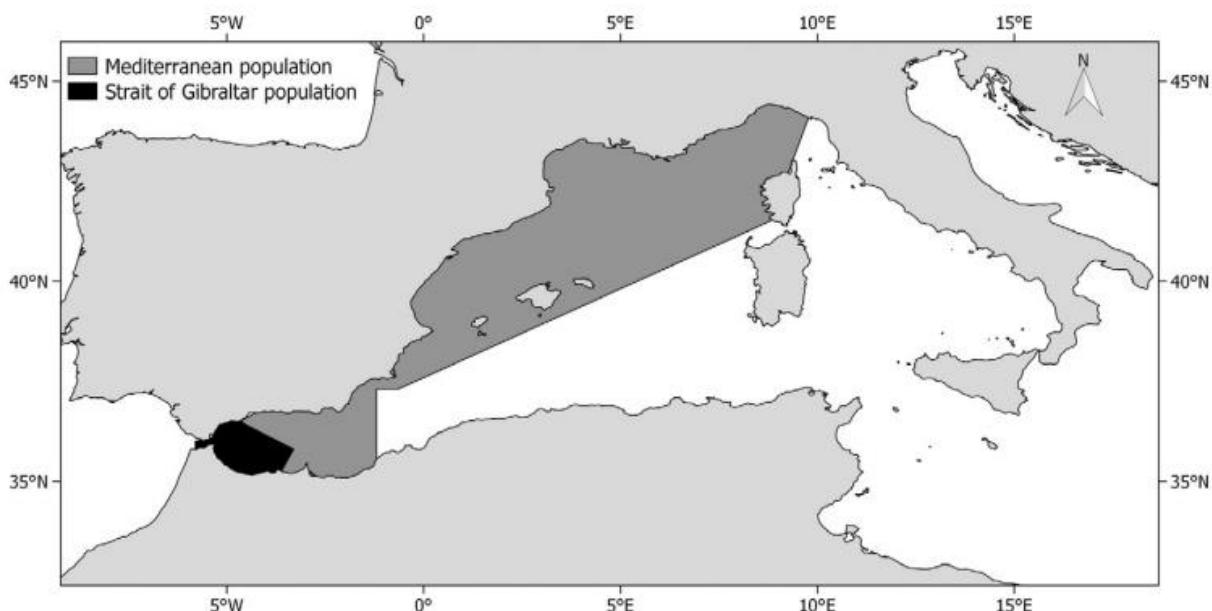


Figura 2.5 - Distribuzione del globicefalo (*Globicephala melas*) in Mediterraneo e nello Stretto di Gibilterra (Verborgh *et al.*, 2016).

A causa della preferenza per gli ambienti pelagici, nel Mediterraneo la specie risente solo parzialmente delle pressioni antropiche che si verificano nelle acque costiere (ACCOBAMS, 2021).

Le principali minacce che colpiscono la popolazione mediterranea includono le interazioni con la pesca, le collisioni con le imbarcazioni, le catture accidentali (*bycatch*) nelle reti da posta derivanti, il disturbo causato dalle operazioni di *whale watching*, specialmente nel Mar Ligure, la contaminazione chimica e le malattie (ACCOBAMS, 2021; Verborgh *et al.*, 2016). Oltre a queste, nello Stretto di Gibilterra in particolare, sono state osservate frequenti cicatrici di ferite causate dagli ami da pesca (ACCOBAMS, 2021) e sono stati rilevati dei cambiamenti nei modelli di respirazione di questi animali in presenza delle imbarcazioni da *whale watching* (Senigaglia *et al.*, 2012); queste non sono però considerate una minaccia importante per la specie (Gauffier *et al.*, 2021). Inoltre, nel Mar Ligure sono state registrate risposte vocali dei globicefali ai sonar militari e gli elevati livelli di traffico marittimo rappresentano probabilmente una minaccia significativa per la specie (Gauffier *et al.*, 2021).

Nel Mediterraneo, è stato dimostrato che i globicefali presentano livelli molto elevati di organoclorurati (PCB e DDT) e ritardanti di fiamma (PBDE) nei loro tessuti, con concentrazioni estreme in individui campionati nello Stretto di Gibilterra (ACCOBAMS, 2021). Queste sostanze possono compromettere la riproduzione e aumentare la suscettibilità alle malattie (Gauffier *et al.*, 2021). Inoltre, nei tessuti di questa specie sono state trovate anche alte concentrazioni di metalli pesanti, quali mercurio e cadmio (Pinzone *et al.*, 2019).

Non sono ancora state adottate misure di gestione specifiche per la conservazione dei globicefali in Mediterraneo. Tuttavia, la specie è inclusa nelle convenzioni CITES (*Convention on International Trade in Endangered Species, App, II*), CMS (*Convention on Migratory Species, App II*), Convenzione di Berna (*App. II*), negli accordi della convenzione di Barcellona (Prot.C.I, Annex II) (ACCOBAMS, 2021), e, insieme a tutte le altre specie di cetacei, rientra negli "Accordi per la Conservazione dei Cetacei nel Mar Nero, Mar Mediterraneo e nella Contigua Area Atlantica" (ACCOBAMS), firmati da 24 Paesi (Verborgh *et al.*, 2021). Nel Mediterraneo nord-occidentale, l'istituzione del Santuario dei mammiferi marini del Mediterraneo, noto anche con il nome di "Santuario Pelagos", poi riconosciuto come Area Specialmente Protetta di Interesse Mediterraneo (SPAMI), ha contribuito alla conservazione di questa specie in Mediterraneo (ACCOBAMS, 2021).

Nel 2017, in Mediterraneo sono state identificate 26 aree importanti per i mammiferi marini (*Important Marine Mammal Areas, IMMAs*). Tra queste, è stata definita come importante per i globicefali la "Alborán Deep IMMA", nel mare di Alborán. Oltre a questa area, in altre 5 IMMA la specie è citata tra le specie presenti: "Strait of Gibraltar and Gulf of Cadiz IMMA", "Alborán Corridor IMMA", "Balearic Islands Shelf and Slope IMMA", "Western Ligurian Sea and Genoa Canyon IMMA" e "North West Mediterranean Sea, Slope and Canyon System IMMA" (IUCN-MMPATF, 2017; www.marinemammalhabitat.org).

Capitolo 3 - MATERIALI E METODI

3.1 Area di studio

L'area di studio si trova in Mar Ligure, all'interno del Santuario Pelagos, istituito nel 1991 dall'accordo tra Francia, Italia e Principato di Monaco, ed entrato in vigore il 21 febbraio del 2001 (Notarbartolo di Sciara *et al.*, 2008). L'area del Santuario si estende per circa 87.500 Km², all'interno del quale lo sforzo di campionamento dell'Istituto Tethys Onlus (di seguito riportato come Tethys) si concentra da oltre trent'anni nella porzione nordoccidentale, su una superficie di circa 25.000 Km² (Fig. 3.1).

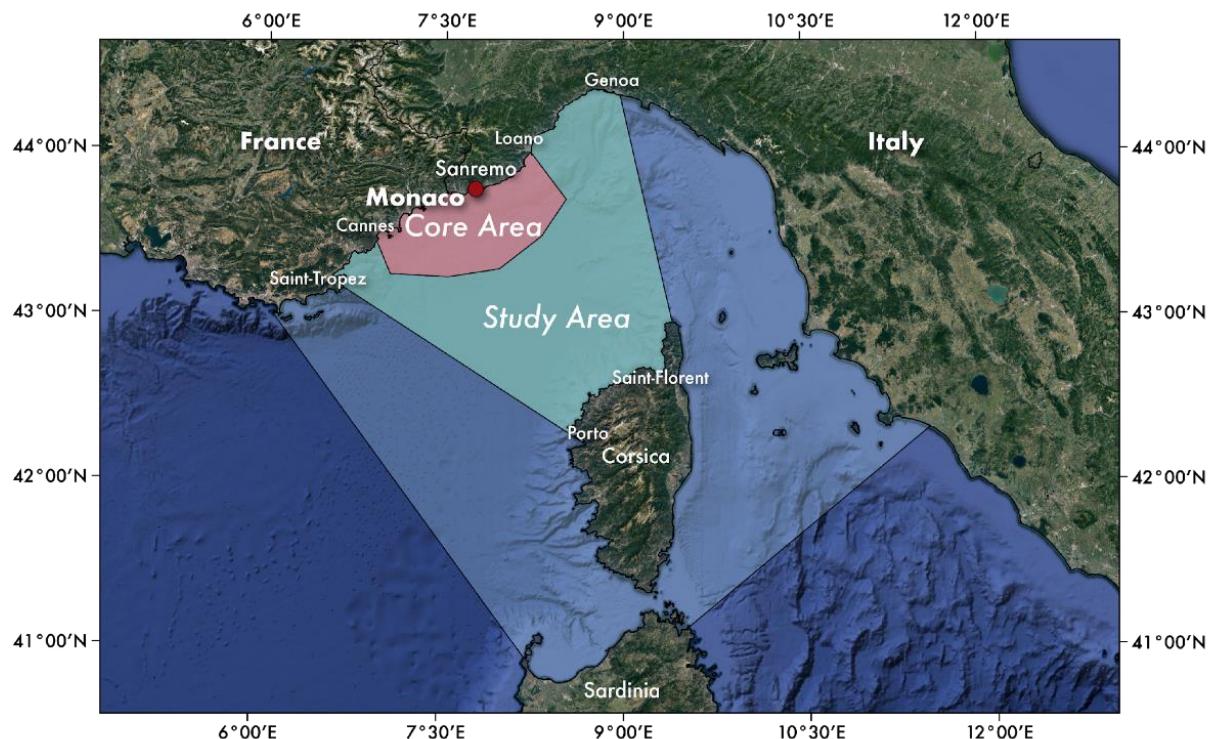


Figura 3.1 - Mappa del Santuario Pelagos, che si estende dalle coste Nord della Sardegna lambendo le coste della Liguria e della Francia. In dettaglio l'area di studio dell'Istituto Tethys Onlus; la "Core Area" indica la zona con maggior sforzo di ricerca negli anni (da: Lanfredi *et al.*, 2021, mappa Valentina De Santis).

Il Mediterraneo è complessivamente un mare oligotrofico; tuttavia, l'area del Mar Ligure presenta una produttività primaria particolarmente elevata, grazie alle condizioni climatiche e oceanografiche che si verificano in questa zona. Una corrente ciclonica che scorre dal nord della Corsica e dalla Toscana, lambendo le coste della Liguria e le coste della Francia, crea un fronte che separa le acque costiere da quelle pelagiche. Questo fenomeno è stagionalmente rafforzato dal vento che spira da nord-ovest (maestrale), che genera un

movimento verticale delle acque favorendo fenomeni di *upwelling* (risalita della corrente) che riportano in superficie i nutrienti.

Queste condizioni favoriscono fenomeni di produzione primaria che si traducono in elevati valori di biomassa di fitoplancton, e di conseguenza di zooplancton. Queste concentrazioni arricchiscono l'intera catena trofica compresi i predatori apicali o "*top predator*". Nel Santuario Pelagos, infatti, sono presenti tutte le 8 specie di cetacei considerati regolarmente presenti in Mediterraneo tra i quali, oltre al globicefalo, troviamo la stenella striata (*Stenella coeruleoalba*), il grampo (*Grampus griseus*), la balenottera comune (*Balaenoptera physalus*), lo zifio (*Ziphius cavirostris*), il capodoglio (*Physeter macrocephalus*), il tursiope (*Tursiops truncatus*) e, in misura minore, il delfino comune (*Delphinus delphis*) (Notarbartolo di Sciara *et al.*, 2008).

Nell'area di studio la morfologia del fondale è molto eterogenea. La porzione nordoccidentale del Mar Ligure è caratterizzata da una piattaforma continentale (0-200 m) particolarmente ristretta, seguita da una ripida scarpata continentale che porta il fondale a superare i 2.000 m, e articolata in un complesso sistema di canyon sottomarini; la parte pelagica si presenta complessivamente con una piana abissale uniforme che si attesta sui 2.500-2.700 m (Notarbartolo di Sciara *et al.*, 2008).

3.2 Raccolta dati

I dati analizzati in questo studio sono stati forniti da Tethys, che opera nell'area di studio dal 1990 nell'ambito del progetto a lungo termine Cetaceans Sanctuary Research (CSR).

I dati acustici utilizzati in questa tesi sono riferiti al periodo 2011-2022 e sono stati raccolti nel periodo estivo, tra maggio e ottobre, nel corso di monitoraggi *ad libitum* condotti da Tethys per mezzo dell'imbarcazione RV Pelagos, un *motorsailer* di 15-20 m di lunghezza, equipaggiato per la raccolta dati (Fig. 3.2) sia visiva che acustica.



Figura 3.2 - Imbarcazione "RV Pelagos" utilizzata da Tethys nell'ambito del progetto CSR, con un gruppo di globicefali (foto proprietà ©Istituto Tethys Onlus).

Il monitoraggio visivo è effettuato durante le ore di luce con almeno due osservatori posizionati a circa 3 m di altezza dalla superficie per mezzo di binocoli regolari 7X50 e in condizioni ambientali standard (velocità dell'imbarcazione 5-11 Km/h; condizioni di vento inferiori a 3 della scala Beaufort) (Fig. 3.3) (Azzellino *et al.*, 2012).



Figura 3.3 - Tecniche di monitoraggio visivo (a destra) e acustico (a sinistra) condotte dall'Istituto Tethys a bordo dell'imbarcazione da ricerca RV Pelagos, (foto proprietà ©Istituto Tethys Onlus).

Il monitoraggio acustico è effettuato utilizzando una cortina idrofonica formata da due idrofoni (BENTOHOS AQ4-range di frequenza tra 10 Hz e i 15 kHz-3 dB) e due preamplificatori (Magrec HP02 con un filtro ad alto passaggio impostato su -3 dB a 100 Hz) e calata a poppa dell'imbarcazione con un cavo di circa 200 m di lunghezza. Il sistema è collegato ad un computer dedicato alla raccolta dati tramite una scheda audio (intervallo di

campionamento: 44.1 e 96 kHz, 16-bit risoluzione). Le registrazioni sono state effettuate per mezzo del software *Sound Emission Analyzer Pro* (SeaPro, CIBRA/Università di Pavia) (Pace *et al.*, 2021) e *PAMguard* (versione 1.5; University of St. Andrews).

Durante il monitoraggio è stato inoltre impiegato il software di raccolta dati Logger 2000 e 2010 (*The International Fund for Animal Welfare* (IFAW)) per raccogliere in maniera sistematica i dati di avvistamento in un database di Access. Per tutti gli avvistamenti sono stati raccolti: la posizione geografica (latitudine e longitudine), le informazioni temporali (anno, mese, giorno, ora), la grandezza del gruppo e la sua composizione (numero totale di animali, numero di adulti, giovani, piccoli e neonati), e la concomitante presenza di altre specie.

3.3 Analisi acustiche

Per il presente studio sono stati estratti ed analizzati i suoni pulsati di globicefalo da 41 registrazioni, della durata complessiva di 23 ore e 34 minuti, raccolte dal progetto CSR di Tethys ed effettuate durante 15 diversi avvistamenti di globicefalo.

Il protocollo di analisi acustica è stato definito riadattando quello proposto da Nemiroff (2009). Le analisi acustiche sono state condotte attraverso il software Raven Pro 1.6 (*Center for Conservation Bioacoustics*) per la visualizzazione degli spettrogrammi, settato sui seguenti parametri per ottimizzare l'identificazione dei suoni pulsati: *Hann window*, FFT 1024, 3 dB *Filter Bandwidth*: 135 Hz, *Overlap* 90%, *Hop Size*: 102.

Le analisi acustiche sono state effettuate allo scopo di consentire una caratterizzazione e una successiva classificazione dei suoni a diversi livelli:

1. Classificazione dei suoni pulsati sulla base della qualità;
2. Caratterizzazione dei suoni pulsati (sulla base dei parametri acustici e delle componenti strutturali);
3. Classificazione dei suoni pulsati in “*call type*” (sulla base della tipologia e del numero di elementi che compongono il suono e del numero di segmenti);
4. Classificazione delle “*call type*” in macrocategorie.

3.3.1. Classificazione sulla base della qualità

In una prima fase, ad ogni suono pulsato identificato è stato attribuito un ID univoco (e.g. PC_001). Successivamente è stato attribuito un livello di qualità (*Quality*) che va da 0 (bassa qualità) a 3 (alta qualità) (Fig. 3.4), sulla base della visibilità sullo spettrogramma del

contorno del suono in relazione al rapporto tra il segnale e il rumore (*Signal-to-noise ratio, SNR*). Per la classificazione della qualità, riportata di seguito, è stata presa come riferimento la suddivisione in 4 categorie proposta da Vester (2017):

- **Q0:** il suono pulsato si presenta debole sullo spettrogramma ed è difficilmente individuabile (Fig. 3.4a) - non è possibile utilizzarlo per le analisi acustiche;
- **Q1:** il suono pulsato è visibile sullo spettrogramma, ma presenta interruzioni (Fig. 3.4b) – è possibile identificare gli elementi che lo compongono ma non estrarre i parametri acustici;
- **Q2:** il suono pulsato è ben visibile dall'inizio alla fine (Fig. 3.4c) – è possibile estrarre la maggior parte dei parametri acustici del suono nel complesso e dei singoli elementi che lo compongono;
- **Q3:** il suono pulsato è preponderante sullo spettrogramma (Fig. 3.4d) - è possibile estrarre tutti i parametri acustici del suono nel complesso e dei singoli elementi che lo compongono.

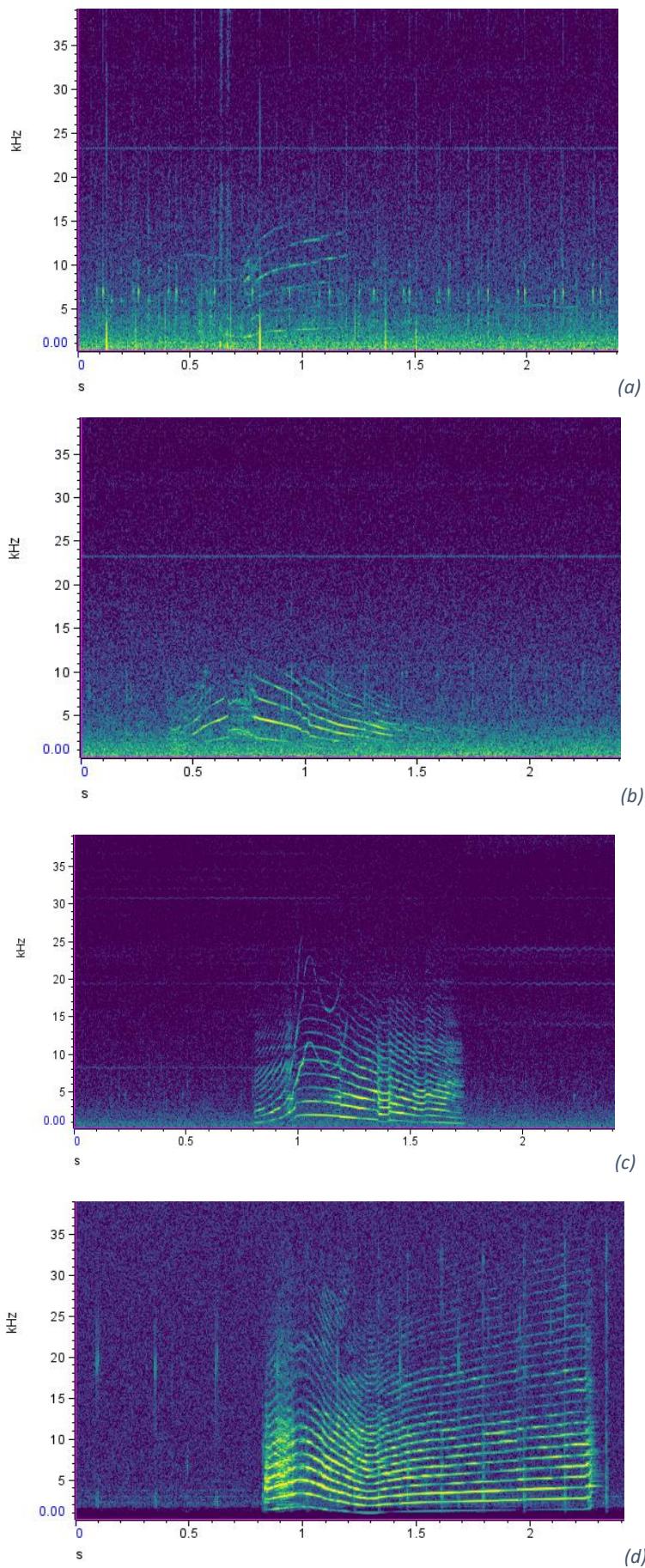


Figura 3.4 - Esempio di attribuzione della qualità sui suoni pulsati. (a) qualità 0, (b) qualità 1, (c) qualità 2, (d) qualità 3 (Hann window, FFT 1024, 3 dB Filter Bandwidth: 135 Hz, Overlap 90%, Hop Size: 102).

3.3.2. Caratterizzazione dei suoni pulsati

I suoni sono stati analizzati acusticamente sia nella loro totalità che nelle loro componenti strutturali, estraendo parametri differenti e specifici.

In una prima fase delle analisi, per tutti i suoni pulsati di qualità uguale o superiore a 1 è stato possibile riconoscere e misurare il numero di elementi (n) e il numero di segmenti (n) che componevano il suono (Tab. 3.1). Due segmenti sono stati considerati parte dello stesso suono se l'intervallo tra di essi non superava i 0.089 secondi (Nemiroff 2009).

Sulla base della forma complessiva dell'elemento ne sono state descritte 6 tipologie (*Element type*), secondo una rielaborazione della classificazione proposta da Vester (2017). A queste 6 categorie di elementi ne è stata aggiunta una settima rappresentata dall'elemento HFC, ovvero dalla componente ad alta frequenza, allo scopo di prendere in esame l'eventuale presenza di una bifonia (*Biphonic 0/1*) (Nemiroff 2009). Le 7 tipologie di elemento sono riportate di seguito: ascendente (A), discendente (D), costante (C), concavo (Cx), convesso (Cx), *buzz* (B) e HFC.

Sui suoni pulsati di qualità uguale o superiore a 2 è stato possibile estrarre i seguenti parametri acustici: durata (s), frequenza minima (Hz), frequenza massima (Hz) e range di frequenza (Hz). Inoltre, su questi suoni sono state fatte ulteriori selezioni sulla frequenza fondamentale del singolo o dei singoli elementi che compongono il suono (Fig. 3.5). La frequenza fondamentale è stata individuata visualizzando lo spettro di frequenza della selezione (*Selection Spectrum View*) e selezionando la frequenza a maggiore energia (Nemiroff 2009). Ad ogni elemento acustico è stato assegnato lo stesso codice ID del suono pulsato corrispondente ed è stato associato un ulteriore codice identificativo (*e.g. PC_001_1*) che specifica il numero della selezione effettuata.

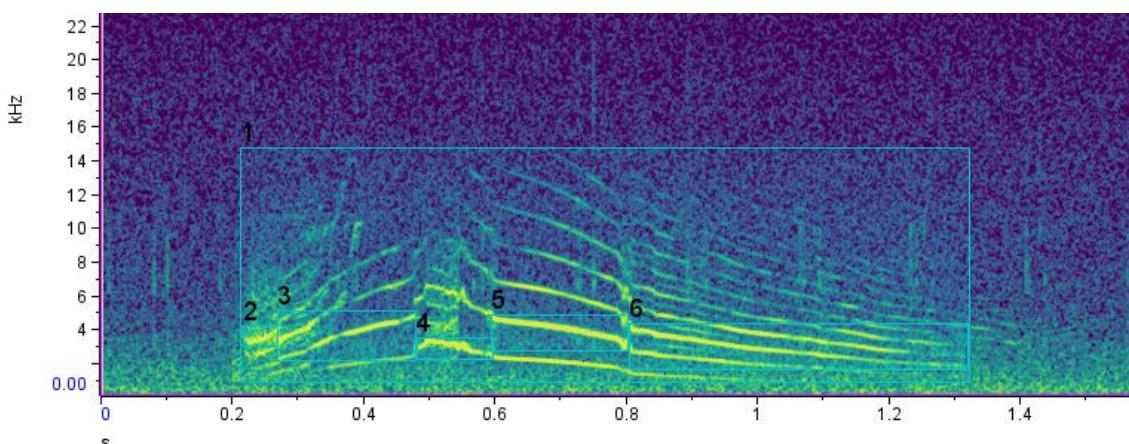


Figura 3.5 - Esempio di selezione di un suono pulsato di qualità uguale o superiore a 2 e delle sue componenti. Nell'immagine, la selezione 1 indica il suono pulsato nella sua interezza, formato da: un primo elemento ascendente (A; selezione 2); un secondo, un terzo e un quarto elemento di forma convessa (Cx; selezioni 3,4 e 5), e un quinto elemento discendente (D; selezione 6) (Hann window, FFT 1024, 3 dB Filter Bandwidth: 135 Hz, Overlap 90%, Hop Size: 102).

Sui singoli elementi sono stati estratti ulteriori parametri acustici: la frequenza iniziale (Hz), la frequenza finale (Hz) e il numero di punti di inflessione (n). Infine, per i suoni pulsati di qualità uguale a 3 è stato possibile estrarre anche l'intervallo di banda (SBI, in Hz) iniziale e finale di ogni elemento (Nemiroff, 2009). Tutti i parametri acustici estratti con le relative definizioni sono riportati nella Tabella 3.1.

Tabella 3.1 - Definizione dei parametri acustici misurati durante le analisi (Adattato da Nemiroff 2009).

Parametri acustici	Definizione	Qualità	Suono totale/ Elemento
Frequenza Minima (Hz)	Estremo inferiore della selezione	2,3	Entrambi
Frequenza Massima (Hz)	Estremo superiore della selezione	2,3	Entrambi
Range di Frequenza (Hz)	Differenza tra la frequenza massima e la frequenza minima	2,3	Entrambi
Durata (s)	Intervallo di tempo tra l'inizio e la fine del suono	2,3	Entrambi
Numero di Elementi (n)	Numero di parti delineate da bruschi cambiamenti del tasso di ripetizione degli impulsi	1,2,3	Suono totale
Numero di Segmenti (n)	Numero di parti separate da uno spazio vuoto	1,2,3	Suono totale
Bifonia (Presenza/Assenza)	Presenza o assenza di una componente ad alta frequenza (HFC)	1,2,3	Suono totale
Frequenza Iniziale (Hz)	Valore iniziale di ogni elemento sulla frequenza fondamentale	2,3	Elemento
Frequenza Finale (Hz)	Valore finale di ogni elemento sulla frequenza fondamentale	2,3	Elemento
SBI Iniziale (Hz)	Intervallo di banda all'inizio di ogni elemento	3	Elemento
SBI Finale (Hz)	Intervallo di banda alla fine di ogni elemento	3	Elemento
Element Type	Forma dell'elemento: Ascendente (A), Discendente (D), Costante (C), Concavo (Cx), Convesso (Cx), Buzz (B), HFC	1,2,3	Elemento
Numero di Punti di Inflessione (n)	Numero di modulazioni brusche di frequenza lungo la frequenza fondamentale dell'elemento (dall'analisi dello spettro di potenza)	2,3	Elemento
Frequenza Fondamentale (Hz)	Frequenza a maggiore energia (dall'analisi dello spettro di potenza)	2,3	Elemento

La complessità della struttura di un suono pulsato di buona qualità è stata valutata considerando il numero di tipologie di elementi che lo caratterizzano. In particolare, un suono ha una struttura “semplice” se è composto da una o due tipologie di elementi diverse, mentre presenta una struttura più “complessa” se presenta tre o più tipologie di elementi differenti.

Per i suoni pulsati di buona e alta qualità è stata calcolata durata, frequenza minima, frequenza massima, range di frequenza, numero di elementi e numero di segmenti. Successivamente, per i suoni pulsati di tutte le qualità è stato calcolato il tasso di emissione (*Emission Rate*, ER) sia per registrazione che per avvistamento (dal momento che un avvistamento poteva avere più di una registrazione). L'ER è stato definito come:

- ER suoni pulsati per registrazione ($ER_{ps,rec}$) = N° suoni pulsati/Durata registrazione (min);
- ER suoni pulsati per avvistamento ($ER_{ps,sight}$) = N° suoni pulsati/Durata avvistamento (min).

3.3.3. Classificazione dei suoni pulsati in “call type”

Nella seconda fase delle analisi, è stata effettuata una classificazione dei suoni pulsati basata sulla struttura interna del suono, secondo il modello proposto da Vester (2017).

A ciascun suono pulsato di qualità uguale o superiore a 1 è stato associato un codice alfanumerico per identificare una categoria di vocalizzazione o “*call type*”, definita da una struttura univoca e ben distinguibile, determinata dalla tipologia e dal numero di elementi che compongono il suono e dal numero di segmenti. Lo stesso codice è stato assegnato a suoni che presentavano la medesima struttura. Eventuali varianti di un suono sono state categorizzate assegnando un codice identificativo composto dalla *call type* corrispondente seguita da un numero (ad esempio, la prima variante di B è stata codificata come B1).

Inoltre, con il parametro “*Similar to*” è stata evidenziata una possibile somiglianza tra le diverse *call type*.

Per ciascuna delle tipologie di elemento costituenti i suoni pulsati è stata calcolata durata, frequenza minima, frequenza massima, range di frequenza, frequenza iniziale, frequenza finale, numero di punti di inflessione, SBI iniziale e finale di ogni elemento.

3.3.4. Classificazione delle “call type” in macrocategorie

Allo scopo di ridurre la complessità del catalogo delle *call type* identificate, le categorie caratterizzate delle stesse tipologie di elementi, seppur combinate in maniera differente e ripetute in numero diverso, sono state unificate in macrocategorie. A ciascuna macrocategoria così ottenuta, è stato assegnato un nuovo codice alfanumerico, al quale è associata una particolare tipologia di struttura di base comune a più categorie, determinata

solo dalla tipologia di elementi che la compongono. Ad esempio, la macrocategoria B è descritta dalla struttura “nC”, dove “C” è la tipologia di elemento che distingue la macrocategoria, cioè un elemento costante (C), mentre “n” rappresenta il numero di ripetizioni dell’elemento C all’interno di ogni categoria di suoni appartenente a questa macrocategoria. In questo modo, tutti i suoni composti da elementi costanti, anche se in numero diverso di ripetizioni, sono stati unificati nella stessa macrocategoria e la variabilità della struttura di base all’interno della macrocategoria è descritta dalla “n” che esprime la variazione del numero di ripetizioni dell’elemento C.

Per ogni macrocategoria è stato poi estratto il numero di ripetizioni dell’elemento e il numero di elementi. Il numero di ripetizioni dell’elemento è un indicatore della complessità della struttura di una macrocategoria. Il numero totale di elementi costituenti un suono tiene conto sia del numero di ripetizioni dell’elemento sia della presenza o dell’assenza dell’elemento HFC (componente ad alta frequenza). Inoltre, anche per le macrocategorie è stata definita la complessità della struttura in “semplice” e “complessa” sulla base del numero di tipologie di elementi che la caratterizzano.

Infine, per ciascun suono selezionato è stata considerata l’eventuale sovrapposizione con altri suoni pulsati attraverso il parametro “Overlap”, inserendo l’ID del suono sovrapposto, allo scopo di valutare la presenza di accoppiamenti specifici di vocalizzazioni nel repertorio acustico di questa specie.

Per ciascuna macrocategoria è stata calcolata durata, frequenza minima, frequenza massima, range di frequenza, numero di elementi e numero di segmenti.

Per discriminare le macrocategorie che nel complesso sono state prodotte maggiormente, è stata utilizzata la mediana del totale delle frequenze delle macrocategorie come valore soglia.

Per le macrocategorie più frequenti sono stati misurati i tassi di emissione per avvistamento. L’*Emission Rate* in questo caso è stato calcolato come:

- ER macrocategoria per avvistamento ($ER_{m,sight}$) = N° ripetizioni macrocategoria/Durata avvistamento (min)

3.4 Analisi di contesto sociale e ambientali

Tutti i suoni analizzati, i rispettivi parametri acustici e la classificazione in *call type* e macrocategorie sono stati riportati in una matrice Excel. Oltre ai parametri acustici, ad ogni suono pulsato estratto sono stati associati il numero dell’avvistamento con le relative informazioni temporali (anno, mese, giorno, ora) e geografiche (latitudine e longitudine), e

i relativi parametri di contesto sociale, quali la dimensione del gruppo stimata sul campo durante l'avvistamento (*group size*) e la sua composizione (numero di adulti, di giovani, di piccoli e di neonati). Il numero di piccoli è stato trasformato successivamente in una variabile categoriale divisa in 4 classi [1 (1 piccolo), 2 (2 piccoli), 3 (5 piccoli), 4 (10 piccoli)], mentre la dimensione del gruppo (*group size*) è stata successivamente suddivisa in tre classi:

- La classe “1” comprende i gruppi < 20 individui;
- La classe “2”, comprende i gruppi con un numero compreso tra 20 e 40 individui;
- La classe “3” comprende i gruppi > 40 individui.

I dati relativi alle registrazioni analizzate sono stati georeferenziati usando il software QGIS (*Quantum Geographic Information System*; ver. 3.16; Hannover, 2020). I dati relativi alla profondità del fondale (m) sono stati ottenuti tramite elaborazione del raster GEBCO (https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/) One minute Digital Atlas, attraverso il tool “Analisi raster” di QGIS. Per ognuna delle posizioni associate alle registrazioni sono stati calcolati i valori di profondità attraverso il tool “Statistiche zonali” di QGIS. Infine, sulla base del valore della profondità del fondale associato ad ogni avvistamento, è stato possibile classificare le registrazioni in due categorie di habitat (prendendo come valore di riferimento la linea batimetrica dei 2.000 m): l’habitat dei canyon (profondità < 2.000 m) e l’habitat pelagico (profondità > 2.000 m).

3.5 Analisi statistiche

Le analisi statistiche per caratterizzare i parametri acustici dei suoni pulsati e la loro correlazione con il contesto sociale e ambientale sono state condotte utilizzando il software IBM SPSS Statistics, versione 29.0.1.0 (www.ibm.com/it-it/products/spss-statistics). Il software R, versione 4.3.1 (www.r-project.org), è stato invece impiegato per la transizione tra le diverse macrocategorie.

La caratterizzazione acustica dei suoni pulsati e degli elementi costituenti è stata effettuata considerando i suoni di qualità 2 e 3. Per ognuno dei parametri acustici (riportati nel paragrafo 3.3) sono state calcolate le statistiche descrittive quali: media, errore standard, intervallo di confidenza al 95%, mediana, minimo, massimo e deviazione standard. Anche per l’*Emission Rate* sono state calcolate le sudette statistiche descrittive.

Il test di Shapiro-Wilk è stato applicato per verificare la distribuzione delle variabili quantitative (Tab. 3.2). Laddove l’assunzione di normalità non è stata rispettata, sono stati adottati test non-parametrici. Per testare l’andamento delle variabili quantitative in

funzione delle variabili dicotomiche (assenza/presenza o habitat, vedi Tab. 3.2) è stato utilizzato il test di Mann-Whitney (Tab. 3.3).

Il test di Kruskal-Wallis e il successivo test post hoc di Dunn (Tab 3.3) sono stati eseguiti per il confronto tra le variabili quantitative e tre o più categorie (Tab. 3.2).

Infine, per testare la correlazione tra due variabili quantitative è stato utilizzato il coefficiente di correlazione di Spearman.

Tabella 3.2 - Variabili quantitative e variabili categoriali utilizzate nello studio.

Variabili quantitative	Variabili categoriali
Durata (s)	Presenza/assenza dell'HFC
Frequenza minima (Hz)	Presenza/assenza di giovani
Frequenza massima (Hz)	Presenza/assenza di piccoli (<i>calf</i>)
Range di Frequenza (Hz)	Numero di piccoli (<i>calf</i>) (1; 2; 5; 10)
Frequenza iniziale (Hz)	<i>Group size</i> (< 20; 20-40; > 40)
Frequenza finale (Hz)	Tipologia di habitat (Canyon; Pelagico)
Numero di elementi (n)	Complessità (semplice; complessa)
Numero di segmenti (n)	
Numero di ripetizioni dell'elemento (n)	
Numero di punti di inflessione (n)	
<i>Emission rate</i> (N suoni pulsati/min)	
Profondità del fondale (m)	

Tabella 3.3 – Quadro di sintesi dei test statistici utilizzati in questo lavoro.

Contesto	Variabili indipendenti	Variabili dipendenti	Test
Acustica dei suoni pulsati	Presenza/assenza dell'HFC Complessità	Durata Durata Frequenza minima Frequenza massima Range di frequenza	Mann-Whitney
Sociale	<i>Group size</i> Presenza/assenza di giovani Presenza/assenza di piccoli (<i>calf</i>) Numero di piccoli (<i>calf</i>) Presenza/assenza di neonati	Durata Frequenza minima Frequenza massima Range di Frequenza Frequenza iniziale Frequenza finale Numero di elementi Numero di segmenti Numero di ripetizioni dell'elemento Numero di punti di inflessione	Mann-Whitney Kruskal-Wallis <i>Post hoc</i> di Dunn

		<i>Emission rate</i>	
Ambientale	Tipologia di habitat	Durata Frequenza minima Frequenza massima Range di Frequenza Frequenza iniziale Frequenza finale Numero di elementi Numero di segmenti Numero di ripetizioni dell'elemento Numero di punti di inflessione <i>Emission rate</i>	Mann-Whitney Kruskal-Wallis <i>Post hoc</i> di Dunn

In particolare, il test di Mann-Whitney è stato effettuato per studiare la variabilità dei parametri acustici dei suoni pulsati (durata, frequenza minima, frequenza massima e range di frequenza) e delle componenti strutturali delle macrocategorie (numero di elementi, numero di segmenti e numero di ripetizioni dell'elemento) in funzione del contesto sociale (presenza/assenza di giovani, di piccoli, di neonati) e ambientale (profondità del fondale). Questo test è stato condotto anche per valutare la relazione tra la durata dei suoni e la presenza della componente ad alta frequenza (HFC). Inoltre, è stata fatta una correlazione tra la complessità della struttura e i parametri acustici (durata, frequenza minima, frequenza massima e range di frequenza) per confrontarne i valori nei suoni pulsati che presentano una struttura semplice e in quelli che hanno una struttura più complessa.

La variabilità dei parametri acustici in funzione della *group size* è stata testata adottando il test di Kruskal-Wallis e il successivo test *post hoc* di Dunn. Gli stessi test sono stati condotti considerando unicamente la componente ad alta frequenza (HFC), i cui parametri acustici (durata, frequenza minima, frequenza massima, range di frequenza, frequenza iniziale, frequenza finale e numero di punti di inflessione) sono stati testati verso le stesse variabili sociali e la profondità del fondale. Infine, questi test sono stati utilizzati anche per correlare il numero di ripetizioni dell'elemento e il numero di piccoli (*calf*).

Anche i valori di *Emission Rate* per avvistamento dei suoni pulsati sono stati testati verso le variabili sociali e la profondità del fondale.

Al fine di indagare la presenza di eventuali relazioni di dipendenza tra le macrocategorie identificate e quindi di accoppiamenti specifici di queste vocalizzazioni, è stato applicato l'algoritmo di Markov-Chain (i.e. catene di Markov), un modello matematico di un fenomeno random che evolve nel tempo in un modo tale che il passato influenza il futuro solo tramite il presente. Il "tempo" può essere discreto (variabile intera), continuo (variabile reale), o, più in generale, un insieme totalmente ordinato. Le catene di Markov, o modelli N-grammi, rappresentano quindi una classe di processi stocastici che consentono di modellare le probabilità di transizione tra stati discreti mediante l'ausilio di matrici,

catturando la struttura in sequenze di unità acustiche basate sulla storia recente di un numero finito di tipi di unità discrete. Pertanto, l'occorrenza di un'unità (o la probabilità di occorrenza di un'unità) è determinata da un numero finito di unità precedenti.

La lunghezza della cronologia viene definita ordine e il modello più semplice di questo tipo è un modello di Markov di ordine 0 che presuppone che ciascuna unità sia indipendente da un'altra e determina semplicemente la probabilità di osservare qualsiasi unità senza alcuna conoscenza precedente. Un modello di Markov di 1° ordine (*First-Order Markov chain model*, FOMM), adottato in questo studio, è quello in cui la probabilità che ogni unità si verifichi è determinata solo dall'unità precedente, insieme alla "probabilità di transizione" da un'unità all'altra. Si presume che questa probabilità di transizione sia costante (stazionaria).

Capitolo 4 – RISULTATI

4.1 Identificazione, catalogazione e descrizione acustica dei suoni pulsati

4.1.1 Qualità

Il presente studio è stato condotto analizzando 41 registrazioni raccolte durante 15 avvistamenti di globicefalo (Fig. 4.1) effettuati in un arco temporale di 11 anni, dal 2011 al 2022. Di queste registrazioni, 34 (82%) contengono suoni pulsati, per una durata complessiva di 21 ore e 53 minuti.

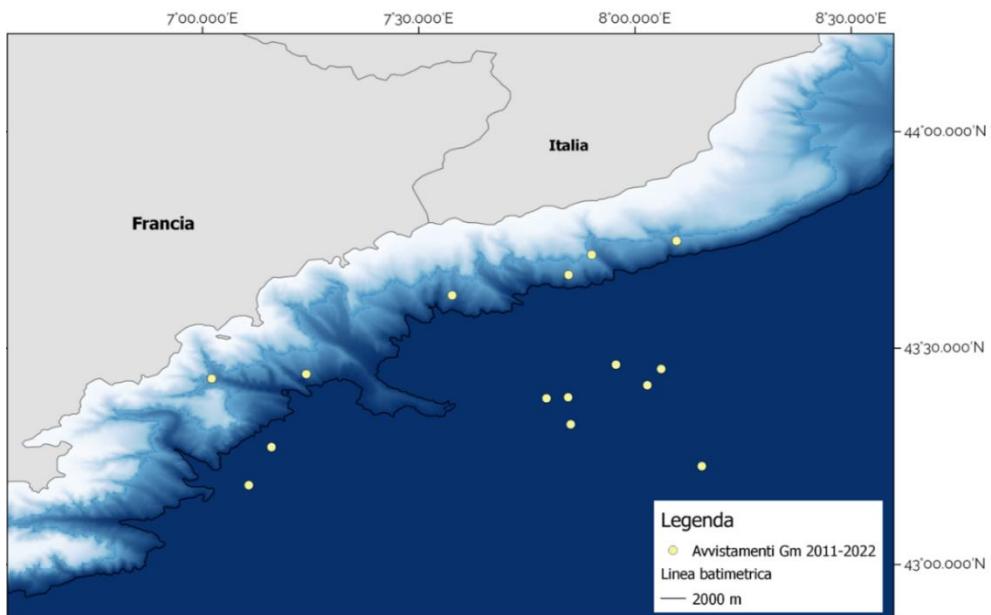


Figura 4.1 - Distribuzione dei 15 avvistamenti di *G. melas* nell'area di studio nel periodo 2011-2022.

Nelle 34 registrazioni sono stati estratti 2120 suoni pulsati. Di questi, il 13.5% (N=286) ha mostrato una qualità medio-alta, con 221 suoni di qualità 2 e 65 suoni di qualità 3 (Tab. 4.1).

Tabella 4.1 - Tabella che illustra sinteticamente la frequenza e la percentuale delle qualità dei suoni pulsati raccolti.

Qualità	Frequenza	%
0	522	24.6
1	1312	61.9
2	221	10.4
3	65	3.1
Totale	2120	100.0

4.1.2 Tassi di emissione (ER)

Sul totale dei 2120 suoni pulsati estratti, sono stati misurati sia i tassi di emissione per ognuna delle 34 registrazioni che per ognuno dei 15 avvistamenti (Tab. 4.2). Tre avvistamenti (12, 1 e 9) riportano tassi di emissione più elevati

Tabella 4.2 - Numero di suoni pulsati e tassi di emissione (ER, Emission Rate) per registrazione e per avvistamento.

ID Registrazione	Avvistamento	Suoni pulsati per registrazione	Suoni pulsati per avvistamento	ER _{rec}	ER _{sight}
1) CSR_20110726_102103	(1) 148Gm001	226	226	2.5111	2.5111
2) CSR_20110816_184405	(2) 200Gm002	153	154	1.7	1.6559
3) CSR_20110816_202609		1		0.3333	
4) CSR_20110825_192919	(3) 236Gm004	153	191	2.6379	2.1461
5) CSR_20110825_202732		38		1.2258	
6) CSR_20130726_153113		4		0.2667	
7) CSR_20130726_155245	(4) 103Gm001	29	73	1.8125	1.0139
8) CSR_20130726_161731		40		0.9756	
9) CSR_20150827_080953_352_1	(5) 202Gm002	20	20	0.4082	0.4082
10) CSR_20150827_103047_283	(6) 203Gm003	3	3	0.12	0.12
11) CSR_20160803_093647_746		7		0.2258	
12) CSR_20160803_100751_929	(7) 114Gm001	8	18	0.2581	0.2368
13) CSR_20160803_103856_064		3		0.2143	
14) CSR_20160901_173308_679	(8) 176Gm002	11	19	1.8333	2.1111
15) CSR_20160901_180216_689		8		2.6667	
16) CSR_20170817_091440_982		105		3.3871	
17) CSR_20170817_094545_122	(9) 206Gm002	53		1.7097	
18) CSR_20170817_101649_258		84		2.7097	
19) CSR_20170817_104753_392		21		1.1053	
20) CSR_20190918_060146_2CH96K16		26		0.8966	
21) CSR_20190918_063037_2CH96K16	(10) 236Gm001	48	376	0.6957	2.0
22) CSR_20190918_073843_2CH96K16		302		3.3556	
23) CSR_20200715_124256_2CH96K16	(11) 33Gm001	4	4	0.0449	0.0449
24) CSR_20200916_114719		177		3.9333	
25) CSR_20200916_125303	(12) 151Gm002	238	436	5.2889	4.2745
26) CSR_20200916_140659		21		1.75	
27) CSR_Gm_20200917_123956	(13) 161Gm003	24	72	0.7742	1.5652
28) CSR_Gm_20200917_134641		48		3.2	
29) CSR_20220713_164758_792		44		1.1282	
30) CSR_20220713_172637_872	(14) 97Gm001	5	50	0.0806	0.4425
31) CSR_20220713_182846_664		1		0.0833	
32) CSR_20220824_113847_432_Gm002		112		1.8667	
33) CSR_20220824_123916_048_Gm002	(15) 161Gm002	80	215	1.2903	1.5468
34) CSR_20220824_134125_003_Gm002		23		1.3529	

4.1.3 Categorie e macrocategorie

Per il subset di dati relativi ai suoni pulsati di qualità ≥ 1 ($N= 1591$), è stata condotta una iniziale caratterizzazione della struttura sulla base delle tipologie e del numero di elementi che compongono il suono e del numero di segmenti.

Il 41.3% ($N= 657$) dei suoni pulsati di qualità ≥ 1 è composto da 3 elementi, seguito da suoni composti da 4 elementi (25.5%, $N= 406$) e da 2 elementi (16.2%, $N= 257$). Il 5.6% ($N= 89$) è composto da 1 elemento, mentre il restante 11.4% ($N= 182$) ha un numero di elementi che può variare da 5 (2.5%, $N= 40$) a 19 (0.1%, $N= 1$). La maggior parte dei suoni pulsati (72.2%, $N= 1149$), inoltre, è costituita da 1 segmento, mentre il restante 27.8% ($N= 442$) presenta più di un segmento, variando tra 2 (21.0%, $N= 334$) e 6 (0.7%, $N= 11$). Il 42.6% ($N= 678$) dei suoni pulsati è caratterizzato da una struttura semplice composta da una o due tipologie di elementi diverse, mentre il 57.4% ($N= 913$) presenta una struttura più complessa caratterizzata da tre o più tipologie di elementi differenti. Il 39.3% ($N= 626$) dei suoni pulsati presenta una componente HFC e può pertanto essere considerato una bifonia, mentre il restante 60.7% ($N= 965$) non ha una componente HFC.

La caratterizzazione della struttura dei suoni pulsati ha permesso l'iniziale classificazione di 77 diverse categorie di suoni pulsati. In appendice è riportata la diversa composizione di ciascuna categoria (vedi Tab. 1 in Appendice). Successivamente, le 77 categorie sono state raggruppate in 33 macrocategorie sulla base della loro composizione in tipologie di elementi (Tab. 4.3). In appendice è riportato in dettaglio il catalogo delle 33 macrocategorie di suoni pulsati (spettrogramma di riferimento e la tabella con i parametri acustici caratterizzanti, calcolati sui 286 suoni pulsati di buona qualità; vedi Tabb. 2-34 in Appendice).

Delle 33 macrocategorie, 16 (48.5%) presentano una struttura semplice, mentre le restanti 17 (51.5%) hanno una struttura complessa. Di seguito è riportata la descrizione delle 33 macrocategorie di suoni pulsati:

- A- La macrocategoria A presenta una struttura costituita da un unico elemento di forma ascendente (A), con il 75% delle categorie che rientrano in questa macrocategoria che presenta anche la componente HFC. Il numero di elementi e il numero di segmenti possono variare da un minimo di 1 a un massimo di 2. I parametri acustici calcolati indicano che la durata media è 1.22 secondi (s.d. = 0.22), la frequenza minima media è 579.4 Hz (s.d. = 296.9) e la frequenza massima media è 14442.6 Hz (s.d. = 4142), con un range di frequenza medio di 13863.3 Hz.
- AA- La macrocategoria AA presenta una struttura costituita da 1 segmento e da 4 elementi: due ripetizioni di un elemento concavo (nCv), un elemento discendente (D) e un elemento costante (C). Questa macrocategoria è rappresentata da un unico

suono pulsato di buona qualità, la cui durata è 1.32 secondi, la frequenza minima è 1538.41 Hz e la frequenza massima è 19807 Hz, con un range di frequenza di 18268.6 Hz.

- *B-* La macrocategoria B presenta una struttura costituita da uno o più elementi costanti (nC), con il 90% delle categorie che rientrano in questa macrocategoria che presenta la componente HFC. L'elemento C viene ripetuto in media 2 volte, con un minimo di 1 e un massimo di 6 ripetizioni, mentre il numero di segmenti può variare da 1 a 6. I parametri acustici calcolati indicano che la durata media è 0.91 secondi (s.d. = 0.2 s), la frequenza minima media è 1513.74 Hz (s.d. = 659.76) e la frequenza massima media è 17399.26 Hz (s.d. = 6175.33), con un range di frequenza medio di 15885.52 Hz.

Tabella 4.3 - Tabella che illustra la classificazione delle 77 categorie di suoni pulsati nelle 33 macrocategorie e la loro composizione in tipologie di elementi.

Macrocategoria	Categorie	Tipologie di Elementi
A	A, T, JJJ, PPP	A
AA	MM	nCv+D+C
B	B, B1, B3, K, K1, O, Q, KK, QQ, GGG	nC
BB	OO	B+Cv+Cx+A
C	B2	HFC
CC	UU	nCv+nCx+B
D	B4, K11	nC+B
DD	VV	Cv+Cx+D
E	C	nCv+A+D
EE	AAA	nCv+nCx
F	C1, DD, WW, BBB	nCv+A
FF	OOO	Cv+D
G	D, L, P, PP, KKK	nC+A+Cv
GG	XX, HHH	D+Cx+C
H	E, CC, FFF	nCx+A+D
I	F	A+D
J	G, LLL	nD
K	H, BB, TT, EEE	nC+A
L	I, S, Y, SS, CCC	A+D+C
M	J, AA	nA+Cx+D+Cv
N	M	Cx
O	N, X	nA+Cx
P	R, V, NN, ZZ, III	nC+Cx+A
Q	U, YY	nC+Cv+Cx
R	U1, JJ	nC+Cx
S	W	A+Cx+Cv+D+C
T	Z	nD+A+C+Cv
U	EE, QQ1, DDD, MMM, NNN	nCv

v	FF	B+A+Cx+D
w	GG, RR	B+A
x	HH	B+Cx+A
y	II	nCx+nCv+A
z	LL	nCv+C

- **BB-** La macrocategoria BB presenta una struttura costituita da 1 segmento e da 4 elementi: un buzz (B), un elemento concavo (Cv), un elemento convesso (Cx) e un elemento ascendente (A). I parametri acustici calcolati indicano che la durata media è circa 1 secondo (s.d. = 0.13 s), la frequenza minima media è 1226.60 Hz (s.d. = 249.58) e la frequenza massima media è 16768.53 Hz (s.d. = 2439.45), con un range di frequenza medio di 15541.93 Hz.
- **C-** La macrocategoria C presenta una struttura costituita unicamente da una componente ad alta frequenza (HFC). I parametri acustici calcolati indicano che la durata media è 0.78 secondi (s.d. = 0.02), la frequenza minima media è 5758.43 Hz (s.d. = 190.48) e la frequenza massima media è 16805.32 Hz (s.d. = 3249.88), con un range di frequenza medio di 11046.89 Hz.
- **CC-** La macrocategoria CC presenta una struttura costituita da 1 segmento, da elementi concavi (nCv) e convessi (nCx) e da un buzz (B). Il numero di ripetizioni dell'elemento Cv può variare da 3 a 5, mentre l'elemento Cx può essere ripetuto da 2 a 4 volte. Il numero di elementi può variare da un minimo di 6 a un massimo di 10. I parametri acustici calcolati indicano che la durata media è 1.33 secondi (s.d. = 0.22), la frequenza minima media è 1103.74 Hz (s.d. = 154.18) e la frequenza massima media è 28665.72 Hz (s.d. = 7894.47), con un range di frequenza medio di 27561.98 Hz.
- **D-** La macrocategoria D presenta una struttura costituita da 2 segmenti e da 4 elementi: due ripetizioni di un elemento costante (nC) e un buzz (B) prodotti simultaneamente ad una componente HFC. I parametri acustici calcolati indicano che la durata media è 0.80 secondi (s.d. = 0.10 s), la frequenza minima media è 1383.37 Hz (s.d. = 304.51) e la frequenza massima media è 11472.12 Hz (s.d. = 378.62), con un range di frequenza medio di 10088.75 Hz.
- **DD-** La macrocategoria DD presenta una struttura costituita da 1 segmento e da 4 elementi: un elemento concavo (Cv), un elemento convesso (Cx) e un elemento discendente (D) prodotti simultaneamente ad una componente HFC. Questa macrocategoria è rappresentata da un unico suono pulsato di buona qualità, la cui durata è 1.18 secondi, la frequenza minima è 1263.2 Hz e la frequenza massima è 15038.2 Hz, con un range di frequenza di 13775 Hz.
- **E-** La macrocategoria E presenta una struttura costituita da 4 segmenti e da 4 elementi: due ripetizioni di un elemento concavo (nCv), un elemento ascendente (A) e un elemento discendente (D). I parametri acustici calcolati indicano che la durata

media è 0.88 secondi (s.d. = 0.06), la frequenza minima media è 612.77 Hz (s.d. = 173.77) e la frequenza massima media è 12071.40 Hz (s.d. = 4019.47), con un range di frequenza medio di 11458.63 Hz.

- *EE*- La macrocategoria EE presenta una struttura costituita da 1 segmento e da elementi concavi (nCv) e convessi (nCx). Il numero di ripetizioni dell'elemento Cv può variare da 4 a 10, mentre l'elemento Cx può essere ripetuto da 3 a 9 volte. I parametri acustici calcolati indicano che la durata media è 0.81 secondi (s.d. = 0.06), la frequenza minima media è 2302.47 Hz (s.d. = 294.87) e la frequenza massima media è 16875.77 Hz (s.d. = 1808.38), con un range di frequenza medio di 14573.30 Hz.
- *F*- La macrocategoria F presenta una struttura costituita da una o due ripetizioni di un elemento concavo (nCv) e da un elemento ascendente (A), con il 25% delle categorie che mostra la componente HFC. Il numero di elementi può variare da un minimo di 2 a un massimo di 3, con un numero massimo di 3 segmenti. I parametri acustici calcolati indicano che la durata media è 1.13 secondi (s.d. = 0.22), la frequenza minima media è 869.24 Hz (s.d. = 477.51) e la frequenza massima media è 20483.20 Hz (s.d. = 8959.24), con un range di frequenza medio di 19613.96 Hz.
- *FF*- La macrocategoria FF presenta una struttura costituita da 2 segmenti e da 2 elementi: un elemento concavo (Cv) e un elemento discendente (D). Questa macrocategoria è rappresentata da un unico suono pulsato di buona qualità, la cui durata è circa 1 secondo, la frequenza minima è 983.80 Hz e la frequenza massima è 6767.72 Hz, con un range di frequenza di 5783.92 Hz.
- *G*- La macrocategoria G presenta una struttura costituita da una o due ripetizioni di un elemento costante (nC), da un elemento ascendente (A) e da un elemento concavo (Cv), con il 40% delle categorie che mostra la componente HFC. Il numero di elementi può variare da un minimo di 3 a un massimo di 5, con un numero massimo di 4 segmenti. I parametri acustici calcolati indicano che la durata media è 0.94 secondi (s.d. = 0.12), la frequenza minima media è 1171.97 Hz (s.d. = 684.82) e la frequenza massima media è 22156.59 Hz (s.d. = 5220.23), con un range di frequenza medio di 20984.62 Hz.
- *GG*- La macrocategoria GG presenta una struttura costituita da 1 segmento e da 3 elementi: un elemento discendente (D), un elemento convesso (Cx) e un elemento costante (C). I parametri acustici calcolati indicano che la durata media è 0.76 secondi (s.d. = 0.34), la frequenza minima media è 1018.45 Hz (s.d. = 328.96) e la frequenza massima media è 21214.04 Hz (s.d. = 7048.64), con un range di frequenza medio di 20195.59 Hz.
- *H*- La macrocategoria H presenta una struttura costituita da 1 segmento, da un elemento convesso (nCx), con un numero di ripetizioni che può variare da 1 a 3, da

un elemento ascendente (A) e da un elemento discendente (D). Solamente una categoria (FFF) mostra la componente HFC e il numero massimo di elementi è 5. I parametri acustici calcolati indicano che la mediana della durata è 0.36 secondi, la frequenza minima media è 1047.72 Hz (s.d. = 546.69) e la frequenza massima media è 18505.30 Hz (s.d. = 5561.84), con un range di frequenza medio di 17457.59 Hz.

- *I*- La macrocategoria I presenta una struttura costituita da 1 segmento e da 2 elementi: un elemento ascendente (A) e un elemento discendente (D). I parametri acustici calcolati indicano che la durata media è 0.83 secondi (s.d. = 0.10), la frequenza minima media è 1039.93 Hz (s.d. = 413.93) e la frequenza massima media è 21080.27 Hz (s.d. = 2866.16), con un range di frequenza medio di 20040.34 Hz.
- *J*- La macrocategoria J presenta una struttura costituita da un elemento discendente che può essere ripetuto da 1 a 3 volte (nD), con una sola categoria (LLL) che mostra la componente HFC. Il numero di segmenti può variare da un minimo di 1 a un massimo di 2. I parametri acustici calcolati indicano che la durata media è 1.06 secondi (s.d. = 0.06), la frequenza minima media è 1038.88 Hz (s.d. = 326.87) e la frequenza massima media è 21158.07 Hz (s.d. = 3214.84), con un range di frequenza medio di 20119.19 Hz.
- *K*- La macrocategoria K presenta una struttura costituita da 1 segmento, da una o due ripetizioni di un elemento costante (nC) e da un elemento ascendente (A), con una sola categoria (EEE) che mostra la componente HFC. Il numero di elementi può variare da un minimo di 2 a un massimo di 3. I parametri acustici calcolati indicano che la durata media è 0.65 secondi (s.d. = 0.22), la frequenza minima media è 1228.60 Hz (s.d. = 138.29) e la frequenza massima media è 33226.37 Hz (s.d. = 12196.96), con un range di frequenza medio di 31997.77 Hz.
- *L*- La macrocategoria L presenta una struttura costituita da un elemento ascendente (A), da un elemento discendente (D) e da un elemento costante (C), con il 40% delle categorie che mostra la componente HFC. Il numero di elementi può variare da un minimo di 3 a un massimo di 4 e il numero di segmenti da un minimo di 1 a un massimo di 2. I parametri acustici calcolati indicano che la durata media è 1.27 secondi (s.d. = 0.29), la frequenza minima media è 909 Hz (s.d. = 412.90) e la frequenza massima media è 19822.14 Hz (s.d. = 6055.31), con un range di frequenza medio di 18913.14 Hz.
- *M*- La macrocategoria M presenta una struttura costituita da 1 segmento, da una o due ripetizioni di un elemento ascendente (nA), da un elemento convesso (Cx), da un elemento discendente (D) e da un elemento concavo (Cv). Il numero di elementi può variare da un minimo di 4 a un massimo di 5. I parametri acustici calcolati indicano che la durata media è 1.02 secondi (s.d. = 0.03), la frequenza minima media

è 1034.09 Hz (s.d. = 190.86 Hz) e la frequenza massima media è 10696.95 Hz (s.d. = 849.95), con un range di frequenza medio di 9662.85 Hz.

- *N*- La macrocategoria N presenta una struttura costituita da 1 segmento e da 2 elementi: un singolo elemento convesso (Cx) prodotto simultaneamente alla componente HFC. Questa macrocategoria è rappresentata da un unico suono pulsato di buona qualità, la cui durata è 0.60 secondi, la frequenza minima è 1655.17 Hz e la frequenza massima è 19600 Hz, con un range di frequenza di 17944.83 Hz.
- *O*- La macrocategoria O presenta una struttura costituita da 1 segmento, da una o due ripetizioni di un elemento ascendente (nA) e da un elemento convesso (Cx), con una sola categoria (X) che mostra la componente HFC. Il numero di elementi può variare da un minimo di 2 a un massimo di 4. I parametri acustici calcolati indicano che la durata media è 1.46 secondi (s.d. = 0.15), la frequenza minima media è 1313.71 Hz (s.d. = 220.35) e la frequenza massima media è 16952.15 Hz (s.d. = 473.96), con un range di frequenza medio di 15638.45 Hz.
- *P*- La macrocategoria P presenta una struttura costituita da 1 segmento, da una o due ripetizioni di un elemento costante (nC), da un elemento convesso (Cx) e da un elemento ascendente (A), con una sola categoria (R) che mostra la componente HFC. Il numero di elementi può variare da un minimo di 3 a un massimo di 4. I parametri acustici calcolati indicano che la durata media è 1.08 secondi (s.d. = 0.22), la mediana della frequenza minima è 758.46 Hz e la frequenza massima media è 25983.58 Hz (s.d. = 10439.58), con un range di frequenza medio di 24903.28 Hz.
- *Q*- La macrocategoria Q presenta una struttura costituita da 4 elementi: una o due ripetizioni di un elemento costante (nC), un elemento concavo (Cv) e un elemento convesso (Cx), con una sola categoria (YY) che mostra la componente HFC. Il numero di segmenti può variare da un minimo di 1 a un massimo di 2. I parametri acustici calcolati indicano che la durata media è 1.01 secondi (s.d. = 0.22), la frequenza minima media è 646.23 Hz (s.d. = 377.89) e la frequenza massima media è 21209.11 Hz (s.d. = 7281.17), con un range di frequenza medio di 20562.88 Hz.
- *R*- La macrocategoria R presenta una struttura costituita da 1 segmento, da una o due ripetizioni di un elemento costante (nC) e da un elemento convesso (Cx). Il numero di elementi può variare da un minimo di 2 a un massimo di 3. I parametri acustici calcolati indicano che la durata media è 0.68 secondi (s.d. = 0.22), la frequenza minima media è 1496.74 Hz (s.d. = 897.65) e la frequenza massima media è 14631.86 Hz (s.d. = 2605.73), con un range di frequenza medio di 13135.12 Hz.
- *S*- La macrocategoria S presenta una struttura costituita da 1 segmento e da 6 elementi: un elemento ascendente (A), un elemento convesso (Cx), un elemento concavo (Cv), un elemento discendente (D) e un elemento costante (C) prodotti simultaneamente ad una componente HFC. Questa macrocategoria è rappresentata

da un unico suono pulsato di buona qualità, la cui durata è 1.35 secondi, la frequenza minima è 1597.23 Hz e la frequenza massima è 14874.2 Hz, con un range di frequenza di 13276.97 Hz.

- *T*- La macrocategoria T presenta una struttura costituita da 1 segmento e da 6 elementi: due ripetizioni di un elemento discendente (nD), un elemento ascendente (A), un elemento costante (C) e un elemento concavo (Cv) prodotti simultaneamente ad una componente HFC. I parametri acustici calcolati indicano che la durata media è 1.02 secondi (s.d. = 0.02), la frequenza minima media è 463.95 Hz (s.d. = 26.16) e la frequenza massima media è 20911.29 Hz (s.d. = 1439.06), con un range di frequenza medio di 20447.34 Hz.
- *U*- La macrocategoria U presenta una struttura costituita da un elemento concavo che può essere ripetuto da 1 a 5 volte (nCv), con il 60% delle categorie che mostra la componente HFC. In media il numero di elementi è 2, con un minimo di 1 e un massimo di 6, e il numero di segmenti massimo è 5. I parametri acustici calcolati indicano che la mediana della durata è 0.15 secondi, la frequenza minima media è 1967.06 Hz (s.d. = 802.70) e la frequenza massima media è 17001.02 Hz (s.d. = 4514.40), con un range di frequenza medio di 15033.96 Hz.
- *V*- La macrocategoria V presenta una struttura costituita da 1 segmento e da 4 elementi: un buzz (B), un elemento ascendente (A), un elemento convesso (Cx) e un elemento discendente (D). Questa macrocategoria è rappresentata da un unico suono pulsato di buona qualità, la cui durata è 1.93 secondi, la frequenza minima è 588.56 Hz e la frequenza massima è 39338.98 Hz, con un range di frequenza di 38750.43 Hz.
- *W*- La macrocategoria W presenta una struttura costituita da 1 segmento, da un buzz (B) e da un elemento ascendente (A), con una sola categoria (RR) che mostra la componente HFC. Il numero di elementi può variare da un minimo di 2 a un massimo di 3. I parametri acustici calcolati indicano che la durata media è 0.48 secondi (s.d. = 0.07), la frequenza minima media è 841.11 Hz (s.d. = 349.85) e la frequenza massima media è 23032.10 Hz (s.d. = 414.55), con un range di frequenza medio di 22190.99 Hz.
- *X*- La macrocategoria X presenta una struttura costituita da 1 segmento e da 3 elementi: un buzz (B), un elemento convesso (Cx) e un elemento ascendente (A). I parametri acustici calcolati indicano che la durata media è 0.50 secondi (s.d. = 0.13), la frequenza minima media è 912.25 Hz (s.d. = 581.36) e la frequenza massima media è 26537.47 Hz (s.d. = 11553.36 Hz), con un range di frequenza medio di 25625.22 Hz.
- *Y*- La macrocategoria Y presenta una struttura costituita da 1 segmento, da elementi convessi (nCx) e concavi (nCv) e da un elemento ascendente (A). Il numero di ripetizioni dell'elemento Cx può variare da 4 a 6, mentre l'elemento Cv può essere ripetuto da 3 a 5 volte. Il numero di elementi medio è 10, con un minimo di 8 e un massimo di 12 elementi. I parametri acustici calcolati indicano che la durata media è

1.41 secondi (s.d. = 0.18), la frequenza minima media è 958.05 Hz (s.d. = 160.39) e la frequenza massima media è 31128.93 Hz (s.d. = 9492.13), con un range di frequenza medio di 30170.88 Hz.

- Z- La macrocategoria Z presenta una struttura costituita da 1 segmento, da un elemento concavo che può essere ripetuto da 1 a 3 volte (nCv) e da un elemento costante (C). Questa macrocategoria è rappresentata da un unico suono pulsato di buona qualità, la cui durata è 1.09 secondi, la frequenza minima è 2431.31 Hz e la frequenza massima è 19742.26 Hz, con un range di frequenza di 17310.95 Hz.

4.1.4 Frequenze e tassi di emissione delle macrocategorie

Per tutte le macrocategorie emesse è stata compiuta un'analisi di frequenza e nell'appendice è stata riportata la relativa tabella delle frequenze delle 33 macrocategorie per tutte le 34 registrazioni (vedi Tab. 35 Appendice). Qui viene presentata la frequenza di ciascuna macrocategoria per avvistamento (Tab. 4.4). Dalla tabella è possibile notare come solo nell'avvistamento 6 non siano presenti macrocategorie.

Tabella 4.4 - Frequenza delle 33 macrocategorie per tutti i 15 avvistamenti.

Avv.	A	AA	B	BB	C	CC	D	DD	E	EE	F	FF	G	GG	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
1	6	0	64	0	3	0	5	0	13	0	1	0	14	0	63	11	8	5	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
2	0	0	97	0	0	0	11	0	0	0	0	0	8	0	1	0	1	0	0	0	3	6	13	0	0	0	0	0	0	0			
3	16	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	10	4	0	29	20	35	9	6	30	0	0	0			
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	15	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	9	3	0	0	0		
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	5	0	0		
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	6	0	
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	7	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	
9	0	14	35	12	2	10	0	0	2	0	0	0	24	0	11	0	0	7	6	0	0	5	33	0	0	0	0	2	0	11	0	0	15
10	0	0	0	0	0	0	0	9	0	17	74	0	0	99	0	0	0	0	0	0	0	2	51	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
12	43	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	50	76	78	0	17	0	0	0	0	14	86	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	14	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	0	0	3	9	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
15	19	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	7	0	0	0	0	67	0	3	6	0	0	0	

Utilizzando come valore soglia la mediana del totale delle frequenze delle macrocategorie ($\mu=16$), è emerso che le macrocategorie che si ripetono con più frequenza sono 16 (Tab. 4.5).

Tabella 4.5 - Frequenze totali delle macrocategorie più emesse.

	A	B	BB	EE	F	G	GG	H	J	K	L	O	P	Q	T	U
Frequenza totale	84	211	23	17	87	96	175	195	27	21	31	57	190	86	30	91

Dalla tabella delle frequenze totali si evince che la macrocategoria più emessa è stata la B (N=211), seguita dalla H (N=195), dalla P (N=190) e dalla GG (N=175). Le macrocategorie meno emesse sono state la FF, la N e la V, ciascuna con sole 3 ripetizioni.

Gli *Emission Rate* per avvistamento delle 16 macrocategorie più frequenti sono riportati in tabella 4.6.

Tabella 4.6 - Emission Rate per avvistamento delle 16 macrocategorie più frequenti.

Avv.	ER A	ER B	ER BB	ER EE	ER F	ER G	ER GG	ER H	ER J	ER K	ER L	ER O	ER P	ER Q	ER T	ER U
1	0.07	0.71	0	0	0.01	0.16	0	0.7	0.09	0.06	0.02	0	0	0	0	0
2	0	1.04	0	0	0	0.09	0	0.01	0.01	0	0	0.06	0.14	0	0	0
3	0.18	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.11	0.33	0.22	0.39	0.34	0
4	0	0	0	0	0.15	0	0	0.21	0	0.03	0	0	0	0	0	0.13
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33	0.78	0	0	0
9	0	0.31	0.11	0	0	0.21	0	0.1	0	0.06	0.05	0.04	0.29	0	0	0.02
10	0	0	0	0.09	0.39	0	0.53	0	0	0	0	0	0.01	0.27	0	0.03
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.04	0	0	0	0	0
12	0.42	0	0	0	0.01	0.49	0.75	0.76	0.17	0	0	0.14	0.84	0	0	0
13	0	0.3	0.24	0	0	0	0	0.46	0	0.07	0.2	0	0	0	0	0.17
14	0	0	0	0	0	0	0	0.04	0	0	0	0	0.19	0	0	0
15	0.14	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0.01	0	0	0.05	0	0	0.48

La macrocategoria che presenta in media l'ER maggiore per avvistamento è la P, seguita dalla B e dalla H (Tab. 4.7).

Tabella 4.7 - Emission Rate medi per avvistamento delle 16 macrocategorie più frequenti.

	A	B	BB	EE	F	G	GG	H	J	K	L	O	P	Q	T	U
ER medi	0.05	0.16	0.02	0.01	0.04	0.06	0.09	0.15	0.02	0.02	0.03	0.06	0.17	0.04	0.02	0.06

Delle 16 macrocategorie più frequenti, 8 (50%) hanno una struttura semplice caratterizzata da una o due tipologie di elemento, e queste sono la A, la B, la EE, la F, la J, la K, la O e la U. Le restanti 8 (50%) macrocategorie presentano una struttura più complessa costituita da tre o più tipologie di elemento. Dalla Tabella 4.8 è possibile notare come le macrocategorie con una struttura più semplice abbiano un numero maggiore di ripetizioni dell'elemento caratterizzante la macrocategoria, con ripetizioni che vanno da un minimo di 1 a un massimo di 10. Le macrocategorie più complesse, invece, presentano un minor numero di ripetizioni dell'elemento, variando da un minimo di 1 a un massimo di 3. Il numero di ripetizioni dell'elemento caratterizzante una macrocategoria è rappresentato da "n", che esprime la variabilità della struttura dei suoni appartenenti a quella macrocategoria. Il numero di ripetizioni dell'elemento si riflette anche nel numero totale di elementi costituenti il suono.

Tabella 4.8 - Variabilità della struttura delle macrocategorie più frequenti. La lettera "n" rappresenta il numero di ripetizioni della tipologia di elemento che caratterizza la struttura della macrocategoria. I valori di n sono riportati nella colonna "N° ripetizioni elemento". Il numero di elementi si riferisce al numero di elementi totali costituenti un suono, che tiene conto del numero di ripetizioni dell'elemento e della presenza/assenza dell'elemento HFC (componente ad alta frequenza).

Macrocategoria	Struttura	N° ripetizioni elemento	Numero di Elementi	Frequenza	Percentuale
A	A		1	6	7.1
			2	78	92.9
			Totale	84	100.0
B	nC	1	1	9	4.3
		2	2	78	37.0
		5	3	65	30.8
		6	6	46	21.8
		7	7	13	6.2
			Totale	211	100.0
BB	B+Cv+Cx+A		4	23	100.0
EE	nCv+nCx	4-3	7	3	17.6
		5-4	9	2	11.8
		5-5	10	2	11.8
		6-5	11	4	23.5
		6-6	12	1	5.9
		7-6	13	1	5.9
		8-8	16	2	11.8
		9-8	17	1	5.9
		10-9	19	1	5.9
			Totale	17	100.0
F	nCv+A	1	2	30	34.5
		2	3	57	65.5
			Totale	87	100.0
G	nC+A+Cv	1	3	8	8.3
		2	4	66	68.8
			5	22	22.9
			Totale	96	100.0
GG	D+Cx+C		3	175	100.0

H	nCx+A+D	1	3	3	159	81.5
		3		4	21	10.8
				5	15	7.7
				Totale	195	100.0
J	nD	1	3	1	14	51.9
		3		4	13	48.1
				Totale	27	100.0
K	nC+A	1	2	2	11	52.4
		2		3	10	47.6
				Totale	21	100.0
L	A+D+C			3	12	38.7
				4	19	61.3
				Totale	31	100.0
O	nA+Cx	1	2	2	6	10.5
		2		4	51	89.5
				Totale	57	100.0
P	nC+Cx+A	1	2	3	140	73.7
		2		4	50	26.3
				Totale	190	100.0
Q	nC+Cv+Cx	1	2	4	86	100.0
T	nD+A+C+Cv	2		6	30	100.0
U	nCv			1	55	60.4
				3	15	16.5
				4	3	3.3
				5	8	8.8
				6	2	2.2
				Totale	91	100.0

4.1.5 Catene Markoviane

Allo scopo di individuare l'eventuale presenza di accoppiamenti specifici di tipologie di suoni pulsati all'interno del repertorio acustico di questa specie, è stato applicato il modello delle catene Markoviane sulle 33 macrocategorie identificate. Attraverso la costruzione di una matrice di transizione, si è cercato di determinare la probabilità di transizione tra le 33 diverse macrocategorie.

Considerando una soglia di probabilità di 0.5 (Tab. 4.9), quello che emerge è un pattern a singola macrocategoria. Nella maggior parte dei casi l'evento che ha la maggiore probabilità di verificarsi è che una macrocategoria sia seguita da sé stessa e che quindi una determinata tipologia quando emessa si ripeta in sequenza almeno con un'altra copia di sé stessa.

L'unica macrocategoria che con altrettanta elevata probabilità è seguita da altre due macrocategorie è la B, che rappresenta anche la macrocategoria più frequente. La probabilità

più alta è che la B sia seguita dalla E ($PB-E= 0.67$) (Fig. 4.2), poi la probabilità che la B sia seguita da sé stessa ($PB-B= 0.64$) e la probabilità che la B sia seguita dalla C ($PB-C= 0.6$).

Da questa analisi non sono emersi ulteriori pattern.

Tabella 4.9 - Matrice di transizione che mostra una probabilità di transizione tra le macrocategorie maggiore di 0.5.

	A	B	CC	DD	EE	F	G	GG	H	J	M	O	P	Q	R	T	U	V	Y	Z
A	0.55	0.04	0	0	0	0	0.01	0.14	0.02	0	0	0	0.15	0.01	0	0	0	0	0	
B	0.01	0.64	0	0	0	0.01	0.06	0	0.05	0	0	0.01	0.04	0	0	0	0	0	0	
C	0	0.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
CC	0	0	0.77	0.08	0	0	0	0	0.08	0.08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
DD	0	0	0	0.89	0	0.11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
E	0	0.67	0	0	0	0	0.2	0	0.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
EE	0	0	0	0	0.76	0.18	0	0.06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
F	0	0.01	0	0	0.03	0.72	0	0.09	0	0	0	0.01	0	0.08	0	0	0.05	0	0	
FF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.67	0	0	
G	0	0.13	0.01	0	0	0	0.68	0	0.04	0.02	0	0	0.04	0	0	0	0	0	0	
GG	0.05	0	0	0	0.01	0.04	0	0.66	0.04	0	0	0	0.16	0.02	0	0	0.02	0	0	
H	0.01	0.06	0	0	0	0.01	0.02	0.04	0.77	0.01	0	0.01	0.02	0	0	0	0.01	0	0.01	
J	0	0.11	0.04	0	0	0.04	0	0	0.74	0	0	0.04	0	0	0	0	0	0	0	
M	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0.6	0	0	0.2	0	0	0	0	0	
N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
O	0	0.04	0	0	0	0	0	0.04	0	0	0	0.56	0.25	0.02	0	0.02	0	0	0	
P	0.09	0.05	0.01	0	0	0.02	0.13	0.02	0	0	0.07	0.52	0	0.01	0	0	0	0	0.01	
Q	0.01	0	0	0	0	0.08	0	0.03	0	0	0.01	0.01	0.01	0.81	0.02	0	0	0	0	
R	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.15	0.08	0.62	0	0	0	0	0	
T	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03	0	0.97	0	0	0	0	
U	0.01	0.01	0	0	0	0.03	0	0.03	0.02	0	0	0	0	0	0	0.76	0.01	0	0	
V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33	0.67	0	0	
Y	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.17	0	0	0	0	0.83	0	
Z	0	0	0	0	0	0	0.07	0	0.07	0	0	0	0.07	0	0	0	0	0	0.73	

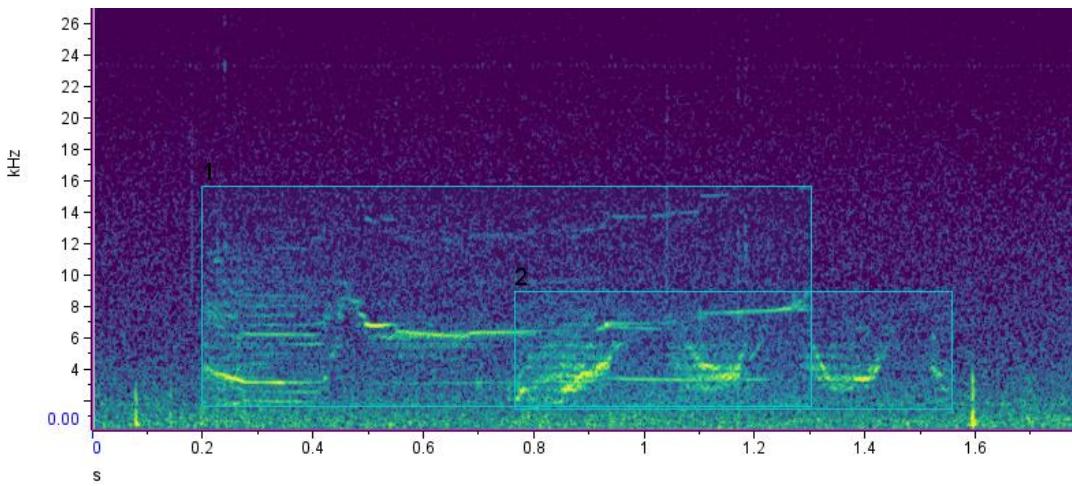


Figura 4.2 - Spettrogramma che mostra la macrocategoria B (selezione 1, a sinistra) seguita dalla macrocategoria E (selezione 2, a destra).

4.1.6 Parametri acustici

Sul subset di suoni pulsati di buona qualità ($N=286$) sono stati estratti e misurati i parametri acustici, quali durata, frequenza minima e massima e range di frequenza. Per ogni parametro sono state calcolate le statistiche descrittive (Tab. 4.10).

Tabella 4.10 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità ($N=286$).

Parametro	Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
Media	0.88	1239	19914	18674.5
Errore standard	0.022	47.937	457.465	459.914
I.C. 95%	0.83-0.92	1145-1334	19013-20814	17769-19579
Mediana	0.93	1083.2	18540.5	17204
Minimo	0.05	191	6196	5456
Massimo	1.9	5892.5	57440.6	54923
Deviazione standard	0.4	810.6	7736.4	7777.8

Selezionando la mediana come indicatore di tendenza centrale, emerge che la durata dei suoni pulsati è 0.93 secondi, con un minimo di 0.05 e un massimo di circa 2 secondi. La

frequenza minima dei suoni pulsati ha un valore mediano di 1.083 Hz, la frequenza massima di circa 18.541 Hz, e il range di frequenza di 17.204 Hz.

La distribuzione campionaria dei valori dei diversi parametri acustici è stata testata attraverso il test di normalità di Shapiro-Wilk. La distribuzione è risultata non seguire una normale ($p<0.001$), pertanto i dati sono stati analizzati applicando un approccio non parametrico.

Gli elementi estratti dal subset di 286 suoni pulsati sono 992. Dalle statistiche descrittive emerge che la mediana del numero di elementi che compongono un suono è 3, con un minimo di 1 e un massimo di 12, mentre quella dei segmenti è 1, con un massimo che può arrivare a 6. Anche in questo caso è stato eseguito un test di normalità di Shapiro-Wilk che ha confermato l'assunzione di non normalità ($p<0.05$).

Le statistiche descrittive dei parametri acustici sono state calcolate anche considerando la tipologia di elementi caratterizzanti i suoni pulsati (Tab. 4.11).

Tabella 4.11 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per le 7 tipologie di elemento costituenti i 286 suoni pulsati di buona qualità.

Ascendente (A)							
Parametro	Frequenza Iniziale (Hz)	Frequenza Finale (Hz)	Punti di inflessione (n)	Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
N	146	146	145	146	146	146	146
Media	2549.9	5369.7	0.49	0.23	2443	5764.1	3321.1
Err. std.	118.9	203.3	0.05	0.02	116.5	205.6	180.7
I.C. 95%	2324.9-2795.3	4976-5779.7	0.4-0.6	0.2-0.3	2223.9-2684.3	5207.8-6020.8	2802.9-3517.4
Mediana	2295.7	5129.5	0.00	0.14	2258.8	5472.8	2540.4
Minimo	334.3	1861.5	0	0.02	206.9	1984.9	595.5
Massimo	5742.3	18234.6	4	0.93	5589.7	27484.9	26654.9
Dev. std.	1433.2	2441.8	0.6	0.23	1403.9	3060.4	2912.8
Costante (C)							
Parametro	Frequenza Iniziale (Hz)	Frequenza Finale (Hz)	Punti di inflessione (n)	Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
N	196	196	196	196	196	196	196
Media	3044.3	3247.2	0.11	0.4	2566.3	3804.8	1238.4
Errore std.	89.2	101.7	0.02	0.02	78.7	102.7	53.3
I.C. 95%	2868.4-3220.2	3046.7-3447.7	0.06-0.15	0.36-0.44	2411-2721.5	3602-4007.4	1133.3-1343.6
Mediana	2808.5	3095.7	0.00	0.28	2477.9	3571.6	1038
Minimo	719.1	992.13	0	0.04	469.9	1157.1	179.43
Massimo	8441.9	10421.1	1	1.24	8122.7	10942.2	3774.5
Dev. std.	1248.8	1423.4	0.3	0.3	1101.8	1438.2	746.5
Concavo (Cv)							
Parametro	Frequenza Iniziale (Hz)	Frequenza Finale (Hz)	Punti di inflessione (n)	Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
N	206	206	186	206	206	206	206
Media	5088.5	5138.9	1.51	0.13	3601.7	6872.4	3270.6

Err. std.	167.5	156.1	0.05	0.005	123.5	166.5	104
I.C. 95%	4906-5566.7	4974-5590	1.42-1.6	0.12-0.13	3509.1-3996.4	5519.3-6176.4	1890-2300.2
Mediana	4900.4	4960.1	2.00	0.1	2994.8	5541.5	1863.8
Minimo	385.7	1133.3	0	0.03	337.5	1753.9	432.4
Massimo	15232.6	12245.2	3	0.42	11043.5	25506.7	22738.1
Dev. std.	2234.6	2091.6	0.6	0.07	1682.5	3989.1	4006.6

Convesso (Cx)

Parametro	Frequenza Iniziale (Hz)	Frequenza Finale (Hz)	Punti di inflessione (n)	Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
N	217	217	217	217	217	217	217
Media	4596.7	4358.4	1.65	0.2	3741.7	6711.7	2970.02
Err. std.	124.9	122.4	0.03	0.01	115.5	198.2	152.7
I.C. 95%	4350.4-4842.9	4117.2-4599.6	1.6-1.72	0.17-0.214	3514-3969.4	6321.1-7102.3	2669.1-3271
Mediana	4179.8	3782.01	2.00	0.14	3218.7	6390.9	2220.4
Minimo	1138.9	1174.3	1	0.04	1037.5	2074.9	418.5
Massimo	10101.7	9971.4	4	1,4623	9439.9	17161.2	11440.8
Dev. std.	1840.4	1802.8	0.5	0.16	1701.9	2919.3	2249.3

Discendente (D)

Parametro	Frequenza Iniziale (Hz)	Frequenza Finale (Hz)	Punti di inflessione (n)	Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
N	112	112	112	112	112	112	112
Media	5041.3	2947.13	0.44	0.23	2769.4	5352.1	2582.6
Err. std.	206.4	113.5	0.06	0.02	108.7	206.4	178.6
I.C. 95%	4632.2-5450.3	2722.1-3172.1	0.33-0.55	0.19-0.26	2554-2984.9	4943-5761.1	2228.7-2936.5
Mediana	4880.3	2847.3	0.00	0.15	2655.2	5253.4	2089.5
Minimo	842.9	735.4	0	0.04	622.5	1175.8	404.1
Massimo	12554.9	7595.9	3	1.3	7054.02	12891.4	8994.4
Dev. std.	2184.7	1201.6	0.58	0.21	1150.8	2184.7	1889.9

HFC

Parametro	Frequenza Iniziale (Hz)	Frequenza Finale (Hz)	Punti di inflessione (n)	Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
N	92	92	92	92	92	92	92
Media	7918.3	9676.04	3.24	0.55	6518.2	12027.9	5509.6
Err. std.	242.18	272.12	0.32	0.03	183.83	497	534.96
I.C. 95%	7437.3-8399.4	9135.5-10216.6	2.61-3.87	0.48-0.62	6153.1-6883.4	11040.7-13015	4447-6572.3
Mediana	7957.35	9077.62	3.00	0.57	6127.08	10429.23	4406.34
Minimo	2027.7	5560.12	0	0.06	2018.02	6967.7	653.3
Massimo	15131.7	18444.4	14	1.26	10789	28401.8	22358.8
Dev. std.	2322.9	2610.1	3.03	0.33	1763.3	4767.02	5131.2

Buzz (B)

Parametro	Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
N	23	23	23	23
Media	0.2	1272.2	13344.5	12072.3
Err. std.	0.02	82.7	1202.9	1235.3
I.C. 95%	0.16-0.23	1100.8-1443.6	10849.8-15839	9510.4-14634
Mediana	0.21	1242.9	12968.5	11639.8
Minimo	0.1	538.75	5211.4	2811.4
Massimo	0.35	2400	26850.3	25735.7

Dev. std.	0.08	396.4	5768.9	5924.2	
------------------	------	-------	--------	--------	--

Per i 65 suoni pulsati di qualità uguale a 3 è stato anche possibile estrarre l'intervallo di banda (SBI, espresso in Hz) iniziale e finale di ogni elemento, le cui statistiche descrittive sono riportate in Tabella 4.12, in particolare per le tipologie A, C, Cv, Cx e D.

Tabella 4.12 - Statistiche descrittive dei parametri acustici SBI iniziale e finale calcolati per le 5 tipologie di elementi.

Ascendente (A)			Costante (C)		
Parametro	SBI Iniziale (Hz)	SBI Finale (Hz)	Parametro	SBI Iniziale (Hz)	SBI Finale (Hz)
N	43	43	N	25	25
Media	1875.9	9232.7	Media	1321.2	1588.4
Err. std.	249.3	6753.8	Err. std.	144.9	188.6
I.C. 95%	1372.9-2379.1	-4397.1-22862.5	I.C. 95%	1022.1-1620.4	1199.2-1977.6
Mediana	990.8	1481.5	Mediana	1160.1	1359.8
Minimo	121.2	276.7	Minimo	538.9	565.1
Massimo	5892.2	292596	Massimo	3457.8	4713
Dev. std.	1634.7	44287.8	Dev. std.	724.6	942.8
Concavo (Cv)			Convesso (Cx)		
Parametro	SBI Iniziale (Hz)	SBI Finale (Hz)	Parametro	SBI Iniziale (Hz)	SBI Finale (Hz)
N	41	41	N	56	56
Media	1966.2	2096.1	Media	2385.8	2445.2
Errore std.	196.2	192.2	Errore std.	166.9	185.6
I.C. 95%	1569.7-2362.6	1707.7-2484.6	I.C. 95%	2051.3-2720.2	2073.3-2817
Mediana	1405.8	1398.1	Mediana	2481.8	2194.7
Minimo	250	268.2	Minimo	369.9	501.4
Massimo	5656.9	5521.1	Massimo	6126.9	5370.2
Dev. std.	1256	1230.7	Deviazione std.	1248.9	1388.6
Discendente (D)					
Parametro	SBI Iniziale (Hz)	SBI Finale (Hz)			
N	20	20			
Media	1349.1	895.2			
Errore std.	178.2	129.01			
I.C. 95%	976.2-1721.9	625.2-1165.2			
Mediana	1224.3	776.4			
Minimo	457.8	288.5			
Massimo	3653.7	2618.2			
Dev. std.	796.8	576.96			

4.1.7 Componente ad alta frequenza (HFC)

Dei 286 suoni pulsati di buona qualità, 92 (32.2%) suoni possono essere considerati richiami bifonici, mentre i restanti 194 (67.8%) suoni non presentano la componente HFC. La relazione tra la durata del suono pulsato e la presenza della componente ad alta frequenza

è stata valutata attraverso un test di Mann-Whitney. Il test rivela che la durata sembra essere significativamente più lunga quando è presente la componente ad alta frequenza (Mann-Whitney U test: $U= 5599.5$, $p<0.05$) (Fig. 4.3).

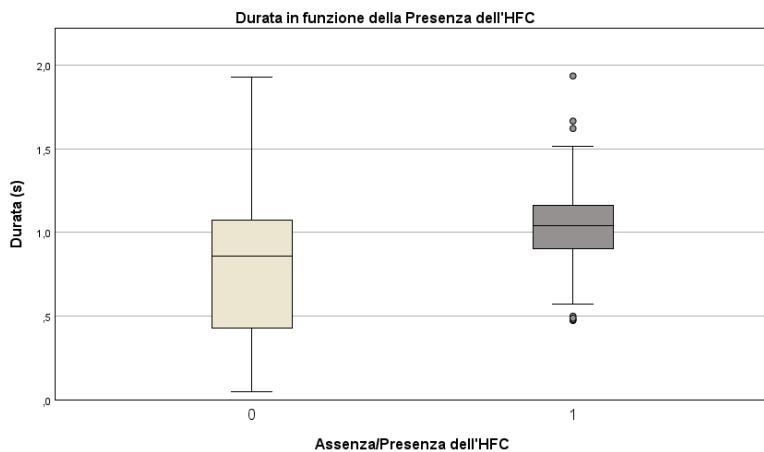


Figura 4.3 - Boxplot che mostra la variabilità della durata dei suoni pulsati in relazione alla presenza/assenza di una componente HFC.

4.1.8 Complessità

125 (43.7%) suoni pulsati di buona qualità presentano una struttura semplice (composta da una o due tipologie di elementi diverse), mentre 161 (56.3%) hanno una struttura più complessa (composta da tre o più tipologie di elementi differenti). Per confrontare i valori dei parametri acustici (durata, frequenza minima, frequenza massima e range di frequenza) nei suoni pulsati che presentano una struttura semplice e in quelli che hanno una struttura più complessa, è stato eseguito un test di Mann-Whitney. Il test ha evidenziato variazioni significative per tutti i parametri, ad eccezione della durata. In particolare, i suoni pulsati con struttura più complessa mostrano, rispetto a quelli semplici, valori di frequenza minima più bassi (Mann-Whitney U test: $U= 6715.5$, $p<0.05$) (Fig. 4.4a), e valori di frequenza massima (Mann-Whitney U test: $U= 6887$, $p<0.05$) (Fig. 4.4b) e range di frequenza più elevati (Mann-Whitney U test: $U= 6379$, $p<0.05$) (Fig. 4.4c).

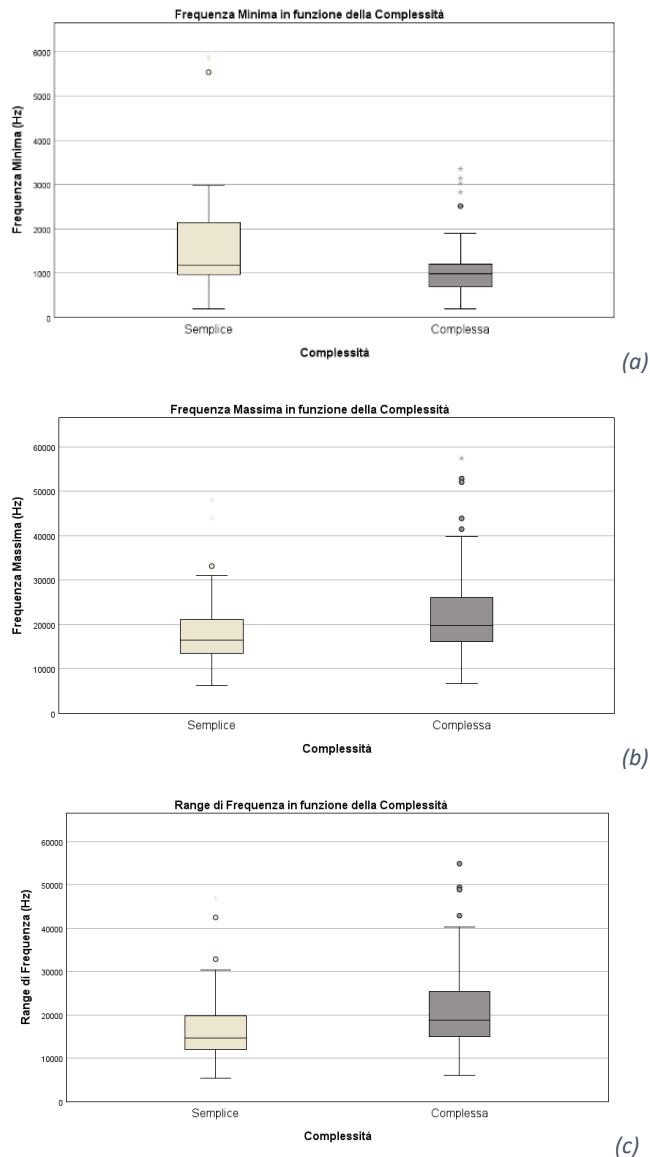


Figura 4.4 - Boxplot dei parametri acustici in relazione alla complessità del suono. a) Frequenza minima; b) Frequenza massima; c) Range di Frequenza.

4.2 Variabilità acustica in base ai contesti di emissione

4.2.1 Contesto sociale

Su un totale di 15 avvistamenti di globicefalo, la presenza di giovani è stata riscontrata in 5 avvistamenti, la presenza di piccoli in 12 avvistamenti e la presenza di neonati in 5 avvistamenti.

4.2.1.1 Tassi di emissione (ER)

Per valutare eventuali variazioni dell'*Emission Rate* dei 2120 suoni pulsati in relazione al contesto sociale, è stato condotto un test di Mann-Whitney tra i 15 valori di ER per avvistamento e la presenza/assenza di giovani, di piccoli e di neonati, e un test di Kruskal-

Wallis verso le 3 categorie di *group size*, ma entrambi i test non hanno evidenziato variazioni significative di questo parametro.

4.2.1.2 Numero di elementi e numero di segmenti

Dei 1591 suoni pulsati che sono stati classificati in tipologie, 414 (26%) sono stati emessi in presenza di giovani, mentre 1177 (74%) in loro assenza. Dai risultati del test di Mann-Whitney, si evince che in presenza di giovani il numero di elementi è minore (Mann-Whitney U test: $U= 217769.5$, $p<0.05$) (Fig. 4.5a), mentre il numero di segmenti sembra mostrare valori più elevati (Mann-Whitney U test: $U= 176909.5$, $p<0.05$) (Fig. 4.5b).

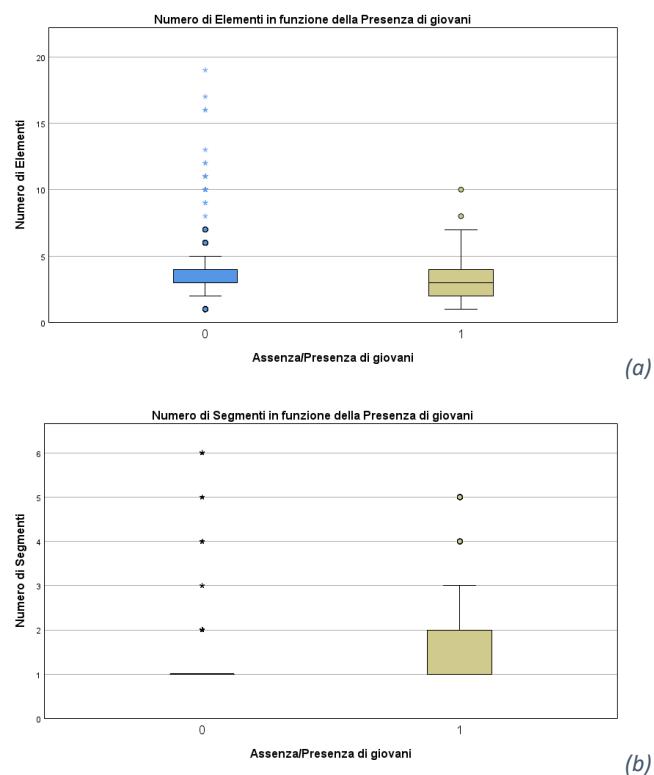


Figura 4.5 - Boxplot che mostrano la variabilità del numero di elementi (a) e del numero di segmenti (b) dei 1591 suoni pulsati in relazione alla presenza/assenza di giovani.

Per quanto riguarda i piccoli, sono stati emessi 1509 (94.85%) suoni in loro presenza, mentre 82 (5.15%) suoni sono stati prodotti in loro assenza. Il test di Mann-Whitney effettuato tra il numero di elementi e la presenza/assenza di piccoli non ha rilevato differenze significative del parametro, mentre sono state evidenziate variazioni significative nel numero di segmenti; in presenza di piccoli, il numero di segmenti è maggiore (Mann-Whitney U test: $U= 43747$, $p<0.05$) (Fig. 4.6).

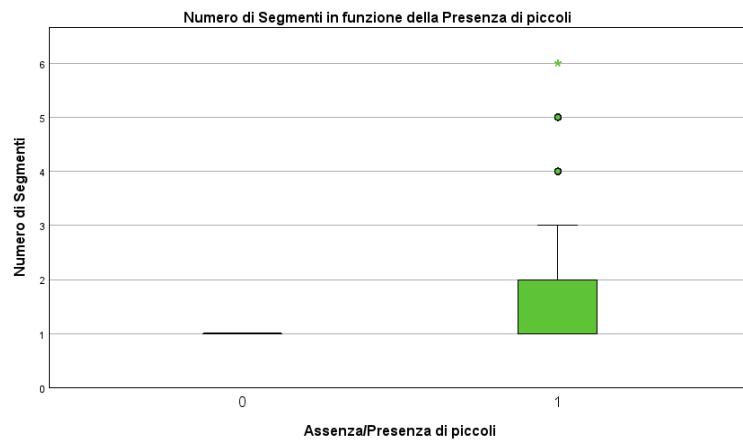


Figura 4.6 - Boxplot che mostra la variabilità del numero di segmenti dei 1591 suoni pulsati in relazione alla presenza/assenza di piccoli.

La presenza di neonati è stata rilevata in 429 (26.96%) casi su 1591, mentre i restanti 1162 (73.04%) suoni sono stati emessi in loro assenza. Dai risultati del test di Mann-Whitney condotto tra il numero di elementi e il numero di segmenti e la presenza/assenza di neonati emerge che, in presenza di neonati, il numero di elementi mostra valori più elevati (Mann-Whitney U test: $U= 204997$, $p<0.05$) (Fig. 4.7a), mentre il numero di segmenti risulta essere minore (Mann-Whitney U test: $U= 235803.5$, $p<0.05$) (Fig. 4.7b).

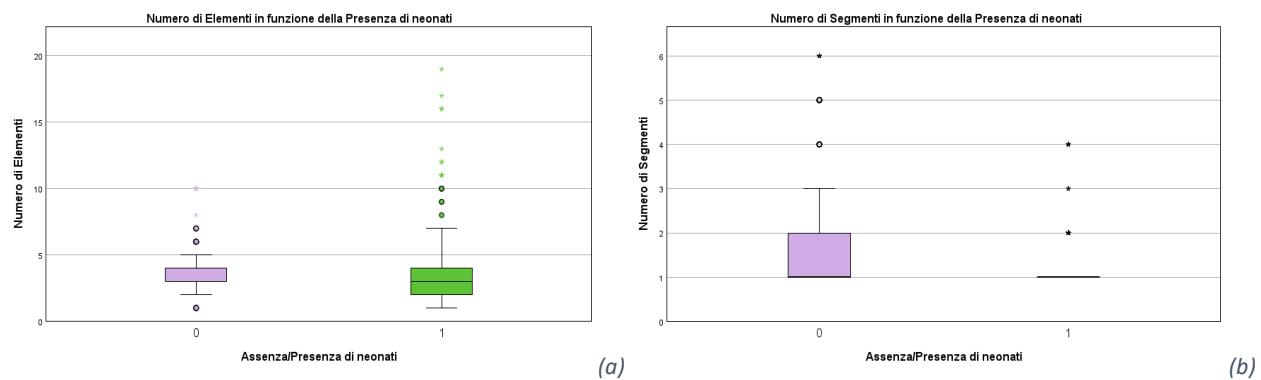


Figura 4.7 - Boxplot che mostrano la variabilità del numero di elementi (a) e del numero di segmenti (b) dei 1591 suoni pulsati in relazione alla presenza/assenza di neonati.

377 (23.70%) suoni pulsati su 1591 sono stati emessi con una *group size* 1, 581 (36.52%) con una *group size* 2 e 633 (39.79%) con una *group size* 3. I risultati ottenuti dal test di Kruskal-Wallis dimostrano che sia il numero di elementi sia il numero di segmenti mostrano variazioni significative per le 3 categorie di *group size* ($p<0.05$). Per verificare quali classi di *group size* differissero significativamente tra loro è stato eseguito il test *post hoc* di Dunn. Dai test effettuati si evince che:

- In gruppi meno numerosi (composti da meno di 20 individui), il numero di elementi è minore (K-W test: $\chi^2= 11.733$, n= 1591, df=2, p<0.05) (Fig. 4.8a; Tab. 4.13a);
- Il numero di segmenti mostra i valori più bassi in gruppi composti da 20-40 individui e i valori più elevati in gruppi composti da più di 40 individui (K-W test: $\chi^2= 181.174$, n= 1591, df=2, p<0.05) (Fig. 4.8b; Tab. 4.13b).

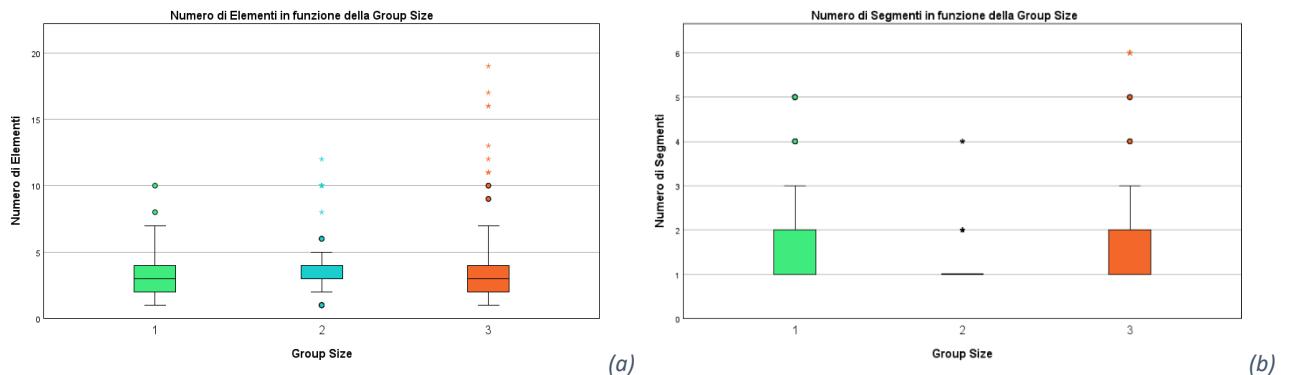


Figura 4.8 - Boxplot che mostrano la variabilità del numero di elementi (a) e del numero di segmenti (b) dei 1591 suoni pulsati in relazione alla group size.

Tabella 4.13 - Risultati del test post hoc di Dunn per il confronto a coppie delle 3 categorie di group size. a) Numero di elementi; b) Numero di segmenti.

a) Numero di Elementi				
Group size	Statistica del test	Errore std.	Statistica test std.	P-value
1-2	-80.49	28.958	-2.78	0.005
1-3	-93.712	28.486	-3.29	0.001
2-3	-13.222	25.157	-0.526	0.599
b) Numero di Segmenti				
Group size	Statistica del test	Errore std.	Statistica test std.	P-value
2-3	-89.02	20.684	-4.304	<0.001
2-1	317.12	23.809	13.32	<0.001
3-1	228.1	23.421	9.739	<0.001

4.2.1.3 Parametri acustici

Dei 286 suoni pulsati analizzati, 89 (31.1%) sono stati emessi in presenza di giovani, mentre i restanti 197 (68.9%) in loro assenza. Dai risultati del test di Mann-Whitney si evince che nessun parametro acustico ha mostrato differenze significative in presenza di giovani.

Per quanto riguarda i piccoli, in loro presenza sono stati emessi 262 (91.6%) suoni pulsati su 286, mentre i restanti 24 (8.4%) in loro assenza. Dai test di Mann-Whitney effettuati emerge che in presenza di piccoli la durata dei suoni è più corta (Mann-Whitney U test: U= 1600.5,

$p<0.05$) (Fig. 4.9a), mentre la frequenza minima mostra valori più alti (Mann-Whitney U test: $U= 2125$, $p<0.05$) (Fig. 4.9b). La frequenza massima e il range di frequenza non mostrano variazioni significative in presenza di piccoli.

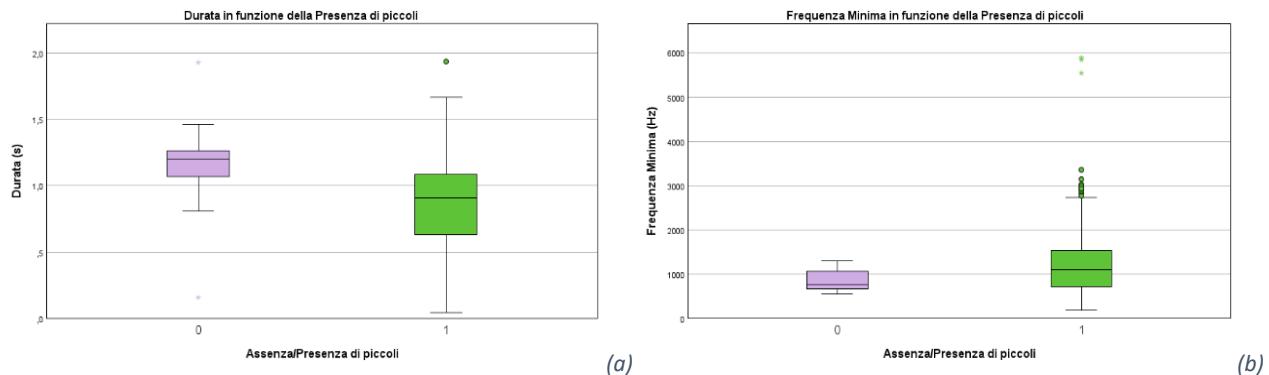


Figura 4.9 - Boxplot che mostrano la variabilità dei parametri acustici in relazione alla presenza/assenza di piccoli (calf). a) Durata; b) Frequenza minima.

Dei 286 suoni pulsati di buona qualità, 81 (28.3%) sono stati emessi in presenza di neonati, mentre i restanti 205 (71.7%) in loro assenza. I risultati del test di Mann-Whitney mostrano in alcuni casi variazioni significative. In particolare, in presenza di neonati la durata dei suoni pulsati appare significativamente più corta (Mann-Whitney U test: $U=5703$, $p<0.05$) (Fig. 4.10a), mentre la frequenza minima mostra valori più elevati (Mann-Whitney U test: $U=5753.5$, $p<0.05$) (Fig. 4.10b).

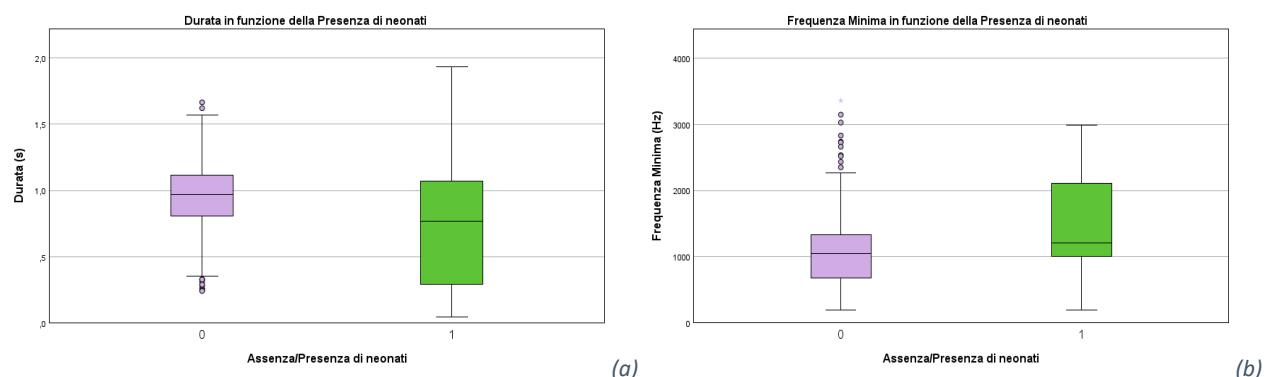


Figura 4.10 - Boxplot che mostrano la variabilità dei parametri acustici in relazione alla presenza/assenza di neonati. a) Durata; b) Frequenza minima.

Dei 286 suoni pulsati, 107 (37.4%) sono stati emessi in un gruppo composto da più di 40 individui (*group size 3*), 99 (34.6%) suoni in presenza di 20-40 individui (*group size 2*) e 80

(28%) suoni in un gruppo composto da meno di 20 individui (*group size* 1). Per verificare eventuali variazioni dei parametri acustici rispetto alle 3 categorie di *group size*, è stato eseguito il test di Kruskal-Wallis. I risultati ottenuti dimostrano che tutti i parametri mostrano variazioni significative per le 3 categorie ($p<0.05$). Per verificare quali classi di *group size* differissero significativamente tra loro è stato eseguito il test *post hoc* di Dunn. Dai test effettuati si evince che:

- I suoni pulsati mostrano una durata significativamente diversa tra i gruppi, con i gruppi composti da 20-40 individui che presentano una durata più elevata (K-W test: $\chi^2=21.442$, $n= 286$, $df=2$, $p<0.05$) (Fig. 4.11a; Tab. 4.14a);
- La frequenza minima è più elevata in gruppi più numerosi (composti da più di 40 individui) e mostra i valori più bassi in gruppi composti da 20-40 individui (K-W test: $\chi^2= 9.034$, $df=2$, $p<0.05$) (Fig. 4.11b; Tab. 4.14b);
- La frequenza massima è significativamente diversa tra i gruppi e presenta i valori più elevati in gruppi composti da 20-40 individui e i valori più bassi in gruppi composti da più di 40 individui (K-W test: $\chi^2=12.905$, $df=2$, $p<0.05$) (Fig. 4.11c; Tab. 4.14c);
- La mediana dei range di frequenza è più elevata in gruppi composti da 20-40 individui (K-W test: $\chi^2=16.357$, $df=2$, $p<0.05$) (Fig. 4.11d; Tab. 4.14d);

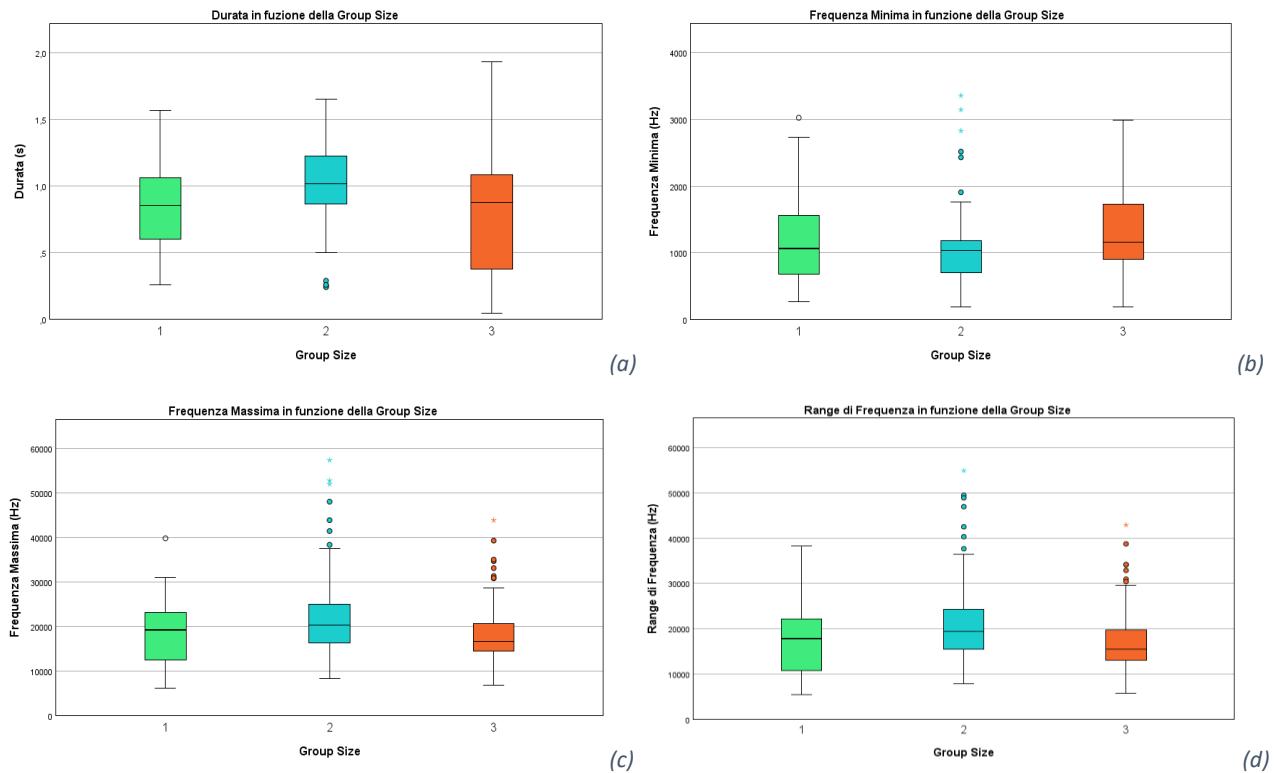


Figura 4.11 - Boxplot che mostrano la variabilità dei parametri acustici in relazione alla group size. a) Durata; b) Frequenza minima; c) Frequenza Massima; d) Range di Frequenza.

Tabella 4.14 - Risultati del test post hoc di Dunn per il confronto a coppie delle 3 categorie di group size. a) Durata; b) Frequenza Minima; c) Frequenza Massima; d) Range di Frequenza.

a) Durata				
Group size	Statistica del test	Errore std.	Statistica test std.	P-value
3-1	1.888	12.224	0.154	0.877
3-2	48.382	11.533	4.195	<0.001
1-2	-46.494	12.434	-3.739	<0.001
b) Frequenza Minima				
Group size	Statistica del test	Errore std.	Statistica test std.	P-value
2-1	15.761	12.434	1.268	0.205
2-3	-34.587	11.533	-2.999	0.003
1-3	-18.826	12.224	-1.54	0.124
c) Frequenza Massima				
Group size	Statistica del test	Errore std.	Statistica test std.	P-value
3-1	11.048	12.224	0.904	0.366
3-2	40.467	11.533	3.509	<0.001
1-2	-29.419	12.434	-2.366	0.018
d) Range di Frequenza				
Group size	Statistica del test	Errore std.	Statistica test std.	P-value
3-1	11.096	12.224	0.908	0.364
3-2	45.261	11.533	3.924	<0.001

1-2	-34.165	12.434	-2.748	0.006
-----	---------	--------	--------	-------

4.2.1.4 Componente ad alta frequenza (HFC)

Oltre alla variabilità acustica dei suoni pulsati nel loro complesso, è stata indagata anche la variabilità della componente ad alta frequenza (HFC) in relazione al contesto sociale. In alcuni casi i risultati dei test mostrano variazioni significative.

La presenza di giovani è stata rilevata 36 (39.1%) volte su 92 occasioni in cui era presente l'HFC. Dai risultati del test di Mann-Whitney emerge che, ad eccezione della durata, della frequenza massima e del range di frequenza, tutti i parametri mostrano differenze significative in presenza di giovani. In particolare, la frequenza minima (Mann-Whitney U test: $U= 643.0$, $p<0.05$) (Fig. 4.12a), la frequenza iniziale (Mann-Whitney U test: $U= 729.0$, $p<0.05$) (Fig. 4.12b), la frequenza finale (Mann-Whitney U test: $U= 725.0$, $p<0.05$) (Fig. 4.12c) e il numero di punti di inflessione (Mann-Whitney U test: $U= 671.0$, $p<0.05$) (Fig. 4.12d) mostrano tutti valori più elevati in presenza di giovani.

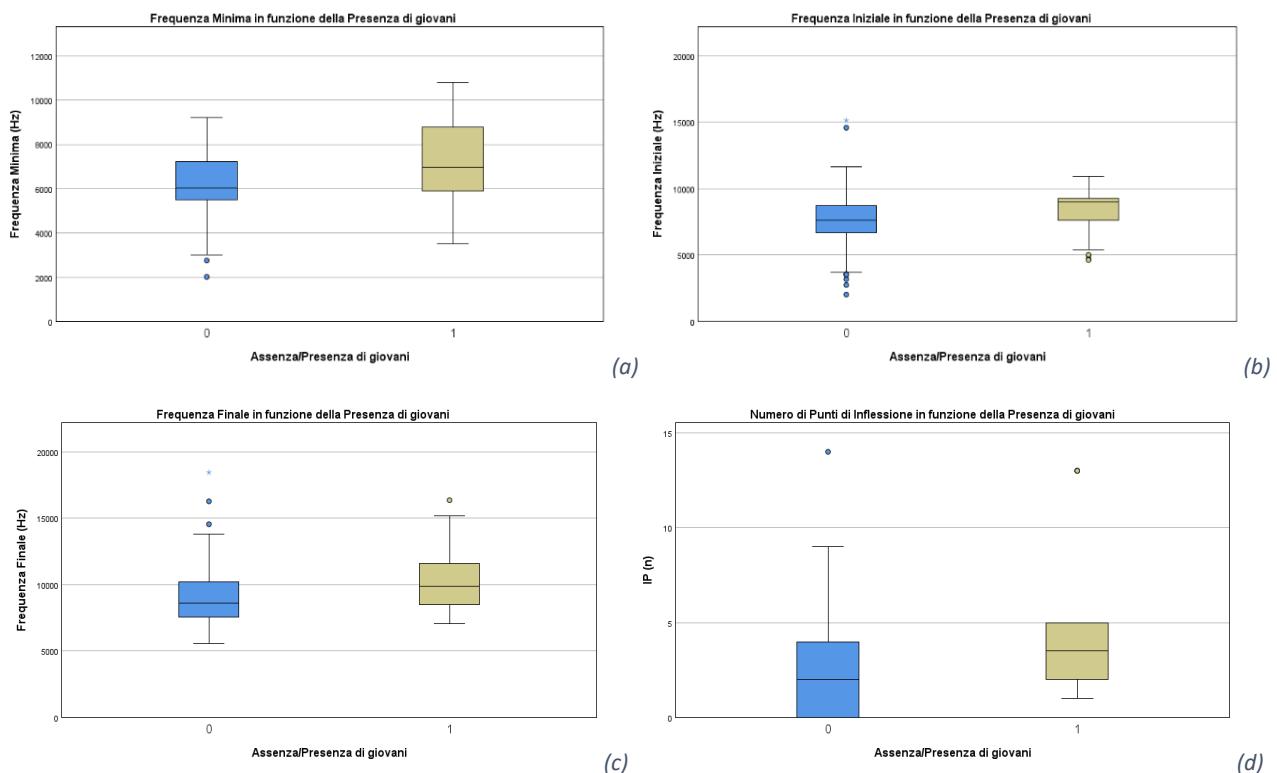


Figura 4.12 - Boxplot che mostrano la variabilità dei parametri acustici della componente HFC in relazione alla presenza/assenza di giovani. a) Frequenza minima; b) Frequenza iniziale; c) Frequenza finale; d) Numero di punti di inflessione.

Su un totale di 92 casi, in 29 (31.5%) di questi la componente HFC viene emessa in un gruppo composto da più di 40 individui, in altri 29 (31.5%) casi viene emessa in presenza di 20-40 individui e in 34 (37%) in un gruppo composto da meno di 20 individui. Per verificare eventuali variazioni dei parametri acustici rispetto alle 3 categorie di *group size*, è stato eseguito il test di Kruskal-Wallis su tutte e 3 le classi. I risultati ottenuti dimostrano che tutti i parametri, ad eccezione della frequenza massima e del range di frequenza, mostrano variazioni significative per le 3 categorie ($p<0.05$). Per verificare quali classi di *group size* differissero significativamente tra loro è stato eseguito il test *post hoc* di Dunn. Dai test effettuati si evince che:

- La componente HFC presenta una durata più elevata in gruppi composti da 20-40 individui e una durata più breve in gruppi composti da meno di 20 individui (K-W test: $\chi^2=8.292$, $n=92$, $df=2$, $p<0.05$) (Fig. 4.13a; Tab. 4.15a);
- La frequenza minima è più elevata in gruppi meno numerosi (composti da meno di 20 individui) (K-W test: $\chi^2= 14.426$, $df=2$, $p<0.05$) (Fig. 4.13b; Tab. 4.15b);
- La frequenza iniziale è significativamente diversa tra i gruppi e presenta i valori più elevati in gruppi composti da meno di 20 individui e i valori più bassi in gruppi composti da più di 40 individui (K-W test: $\chi^2=10.978$, $df=2$, $p<0.05$) (Fig. 4.13c; Tab. 4.15c);
- La frequenza finale presenta i valori più bassi in gruppi composti da 20-40 individui (K-W test: $\chi^2=22.665$, $df=2$, $p<0.05$) (Fig. 4.13d; Tab. 4.15d);
- La mediana del numero di punti di inflessione è più elevata in gruppi composti da meno di 20 individui e più bassa in gruppi composti da 20-40 individui (K-W test: $\chi^2=9.655$, $df=2$, $p<0.05$) (Fig. 4.13e; Tab. 4.15e);

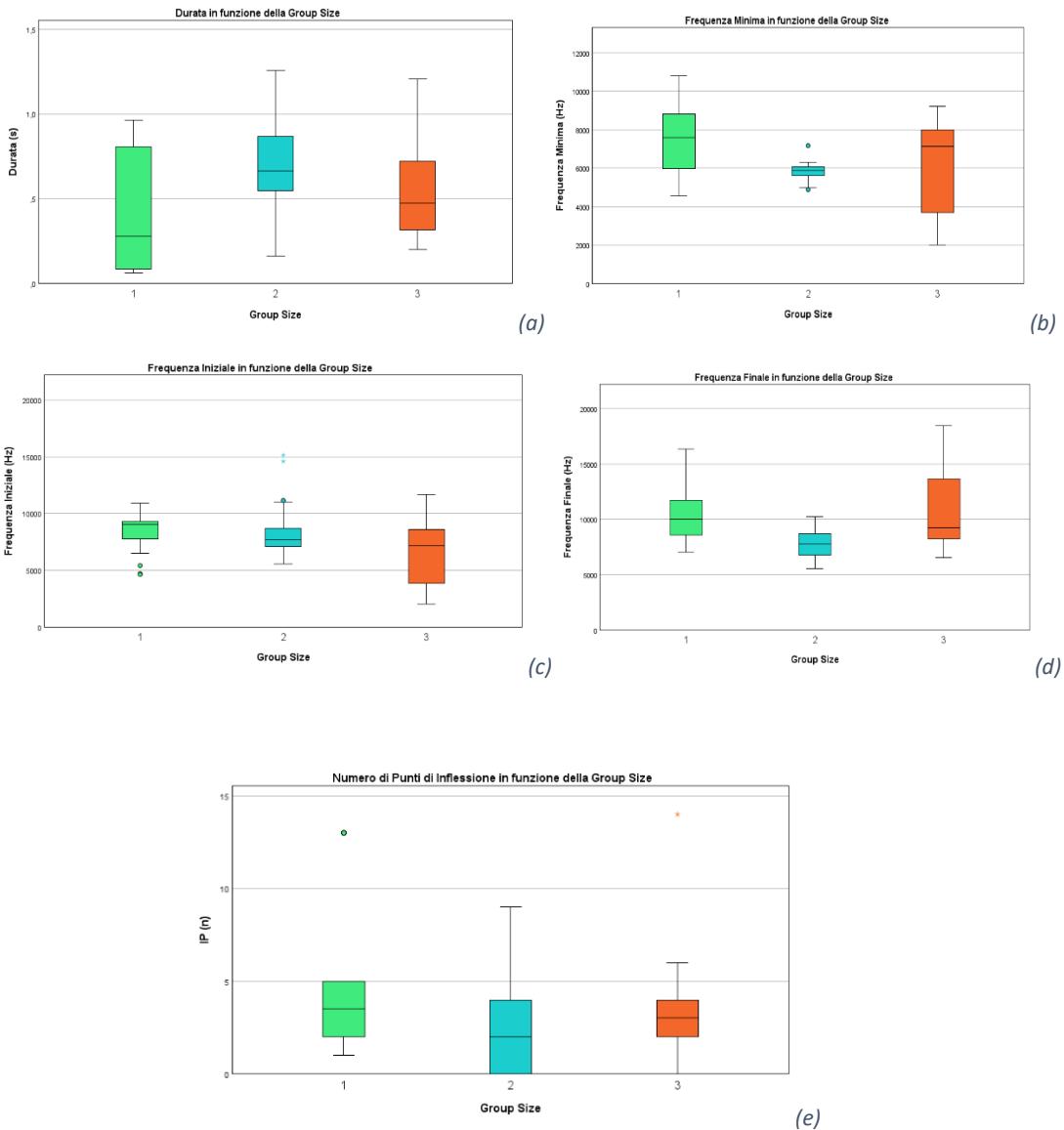


Figura 4.13 - Boxplot che mostrano la variabilità dei parametri acustici della componente HFC in relazione alla group size. a) Durata; b) Frequenza minima; c) Frequenza iniziale; d) Frequenza finale; e) Numero di punti di inflessione.

Tabella 4.15 - Risultati del test post hoc di Dunn per il confronto a coppie delle 3 categorie di group size. a) Durata; b) Frequenza minima; c) Frequenza iniziale; d) Frequenza finale; e) Numero di punti di inflessione.

a) Durata				
Group size	Statistica del test	Errore std.	Statistica test std.	P-value
1-3	-5.897	6.750	-0.874	0.382
1-2	-19.156	6.750	-2.838	0.005
3-2	13.259	7.012	1.891	0.059

b) Frequenza Minima				
Group size	Statistica del test	Errore std.	Statistica test std.	P-value
2-3	-9.448	7.012	-1.347	0.178
2-1	25.205	6.750	3.734	<0.001
3-1	15.757	6.750	2.334	0.020

c) Frequenza Iniziale				
Group size	Statistica del test	Errore std.	Statistica test std.	P-value
3-2	12.345	7.012	1.760	0.078
3-1	22.361	6.750	3.313	<0.001
2-1	10.016	6.750	1.484	0.138
d) Frequenza Finale				
Group size	Statistica del test	Errore std.	Statistica test std.	P-value
2-1	28.476	6.750	4.219	<0.001
2-3	-28.586	7.012	-4.077	<0.001
1-3	-0.111	6.750	-0.016	0.987
e) Numero di Punti di Inflessione				
Group size	Statistica del test	Errore std.	Statistica test std.	P-value
2-3	-11.690	6.918	-1.690	0.091
2-1	20.681	6.658	3.106	0.002
3-1	8.991	6.658	1.350	0.177

4.2.2 Contesto ambientale

4.2.2.1 Tassi di emissione (ER)

I valori di *Emission Rate* non risultano differenti nei due diversi habitat.

4.2.2.2 Numero di elementi e numero di segmenti

Su un totale di 1591 suoni pulsati, 670 (42.11%) sono stati emessi in habitat di canyon, mentre i restanti 921 (57.89%) in habitat pelagico. Il numero di elementi e il numero di segmenti non risultano differenti nei due diversi habitat.

4.2.2.3 Parametri acustici

La variabilità dei parametri acustici dei 286 suoni pulsati di buona qualità è stata valutata anche in base al contesto ambientale. I due fattori ambientali presi in considerazione sono la profondità del fondale e la distanza dalla costa. Tra queste due variabili è stata testata la correlazione attraverso il coefficiente di correlazione di Spearman, che ha restituito una forte correlazione positiva tra le due variabili ($\rho = 0.837$, $p < 0.05$); la profondità nell'area di studio aumenta all'aumentare della distanza dalla costa. Vista l'elevata correlazione tra le

due variabili è stata considerata solamente la profondità del fondale come variabile nelle successive analisi.

Su un totale di 15 avvistamenti di globicefalo, 6 avvistamenti sono avvenuti in habitat di canyon (< 2.000 m). In queste 6 occasioni sono stati emessi 118 (41.3%) suoni pulsati. I restanti 9 avvistamenti sono stati effettuati in habitat pelagico (> 2.000 m) e presentano 168 (58.7%) suoni pulsati.

Nei due diversi habitat, la durata dei suoni pulsati è significativamente differente, con valori più bassi nell'habitat di canyon (Mann-Whitney U test: $U=8231$, $p<0.05$) (Fig. 4.14a) e frequenze minime più elevate (Mann-Whitney U test: $U= 6854.5$, $p<0.05$) (Fig. 4.14b).

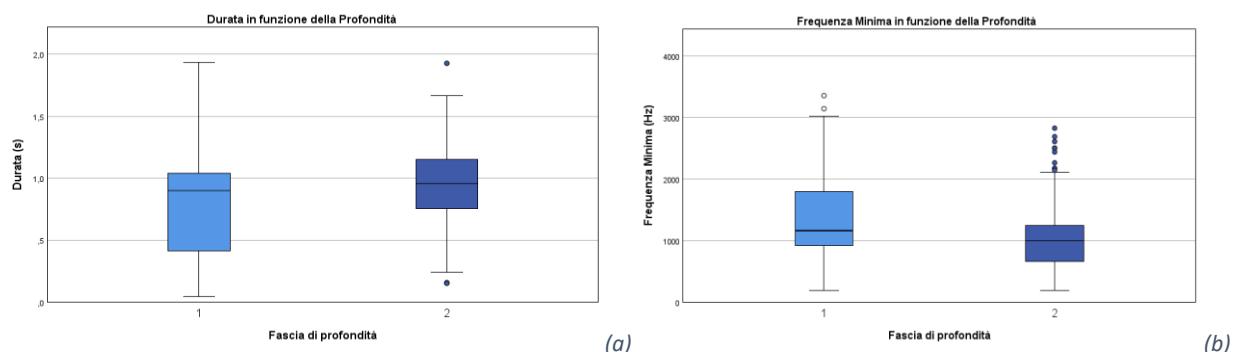


Figura 4.14 - Boxplot che mostrano la variabilità dei parametri acustici in relazione alla fascia di profondità. a) Durata; b) Frequenza minima.

4.2.2.4 Componente ad alta frequenza (HFC)

La variabilità della componente ad alta frequenza (HFC) è stata indagata anche in relazione al contesto ambientale. Su un totale di 92 casi, in 27 (29.4%) la componente HFC è stata emessa in habitat di canyon (< 2.000 m), mentre nei restanti 65 (70.7%) casi è stata emessa in habitat pelagico (> 2.000 m). I risultati del test mostrano variazioni significative per tutti i parametri, ad eccezione della frequenza massima e del range di frequenza. In particolare, nei due diversi habitat, la durata (Mann-Whitney U test: $U= 541.0$, $p<0.05$) (Fig. 4.15a) e il numero di punti di inflessione (Mann-Whitney U test: $U=363.0$, $p<0.05$) (Fig. 4.15b) presentano valori significativamente più elevati in habitat di canyon, mentre risultano più bassi la frequenza minima (Mann-Whitney U test: $U= 501.5$, $p<0.05$) (Fig. 4.15c), la frequenza iniziale (Mann-Whitney U test: $U= 539.0$, $p<0.05$) (Fig. 4.15d) e la frequenza finale (Mann-Whitney U test: $U= 597.0$, $p<0.05$) (Fig. 4.15e).

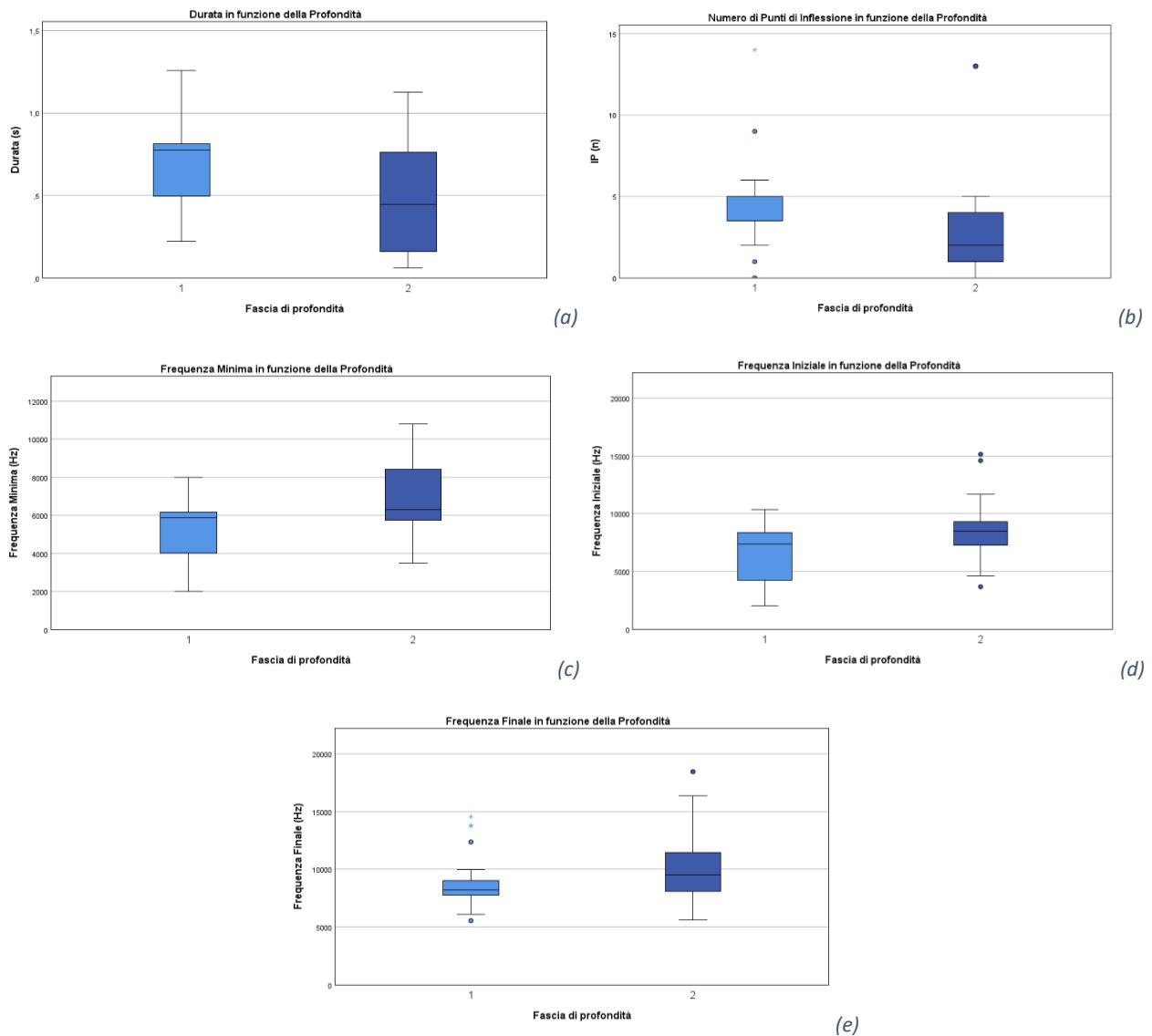


Figura 4.15 - Boxplot che mostrano la variabilità dei parametri acustici della componente HFC in relazione alla fascia di profondità.
a) Durata; b) Numero di punti di inflessione; c) Frequenza minima; d) Frequenza iniziale; e) Frequenza finale.

4.2.3 Correlazione tra il contesto sociale e ambientale e le macrocategorie

4.2.3.1 Contesto sociale

Per questa analisi è stato utilizzato il numero di ripetizioni dell'elemento per le macrocategorie che, tra le più frequenti, presentano un numero maggiore di ripetizioni, ovvero la macrocategoria B, la EE e la U. In particolare:

- La macrocategoria B, che è quella più frequente, viene emessa il 76.3% (N= 161) delle volte in presenza di giovani e il 23.7% (N= 50) delle volte in loro assenza. Questa macrocategoria viene emessa sempre in presenza di piccoli, mentre non viene mai emessa in presenza di neonati. Il 76.3% (N= 161) delle volte viene emessa in una *group*

size 1, il 16.6% (N= 35) delle volte in una *group size 2* e il 7.1% (N= 15) delle volte in una *group size 3*.

- La macrocategoria EE, tra tutte le tipologie di suoni identificate, è quella che presenta un numero di ripetizioni degli elementi (Cv e Cx) maggiore. Questa viene emessa in un solo avvistamento (10, 236Gm001); in particolare, con una *group size 3*, in assenza di giovani, e in presenza di 9 piccoli e 1 neonato.
- La macrocategoria U viene prodotta 9 (10%) volte in presenza di giovani e 82 (90%) volte in loro assenza. In 82 (90%) casi sono presenti i piccoli, mentre in 9 (10%) casi non sono presenti. La presenza di neonati è stata riscontrata in 81 (89%) occasioni. La macrocategoria U non viene mai emessa in una *group size 1*, ma nel 2.2% (N= 2) dei casi è presente in una *group size 2* e nel 97.8% (N= 89) dei casi in una *group size 3*.

Il numero di ripetizioni dell'elemento C, caratterizzante la macrocategoria B, non mostra differenze significative in presenza di giovani.

Su 211 ripetizioni della macrocategoria B, in 64 (30.3%) occasioni era presente 1 piccolo, in 97 (46%) occasioni erano presenti 2 piccoli, in 36 (17.1%) occasioni erano presenti 5 piccoli e in 14 (6.6%) occasioni erano presenti 10 piccoli. I risultati ottenuti dal test di Kruskal-Wallis dimostrano che il numero di ripetizioni dell'elemento C mostra variazioni significative per le 4 categorie del numero di piccoli [1 (1), 2 (2), 3 (5), 4 (10)] ($p<0.05$). Dal successivo test *post hoc* di Dunn (Tab. 4.16) risulta che, per il numero di ripetizioni dell'elemento C:

- La categoria 1 differisce significativamente dalle categorie 3 e 4;
- La categoria 2 differisce significativamente dalle categorie 3 e 4;
- La categoria 3 differisce significativamente dalle categorie 1, 2 e 4;
- La categoria 4 differisce significativamente dalle categorie 1, 2 e 3.

Dai test effettuati si evince che il numero di ripetizioni dell'elemento C è minore in presenza di 5 piccoli (categoria 3) e maggiore in presenza di 10 piccoli (categoria 4) (K-W test: $\chi^2=28.515$, n= 211, df=3, $p<0.05$) (Fig. 4.16).

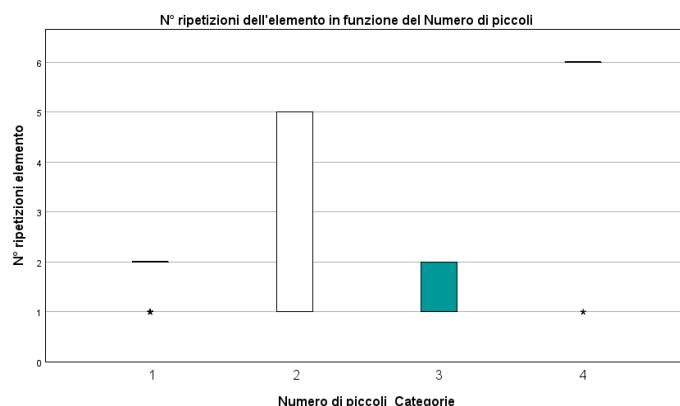


Figura 4.16 - Boxplot che mostra la variabilità del numero di ripetizioni dell'elemento C in relazione al numero di piccoli.

Tabella 4.16 - Risultati del test post hoc di Dunn per il confronto a coppie delle 4 categorie del numero di piccoli.

Categorie	Statistica del test	Errore std.	Statistica test std.	P-value
3-1	27.708	11.991	2.311	0.021
3-2	33.900	11.233	3.018	0.003
3-4	-95.619	18.129	-5.274	<0.001
1-2	-6.192	9.269	-0.668	0.504
1-4	-67.911	16.983	-3.999	<0.001
2-4	-61.719	16.456	-3.751	<0.001

Il numero di ripetizioni dell'elemento Cv, per la macrocategoria U, non risulta differente né in presenza di giovani né in presenza di piccoli, mentre mostra i valori più bassi in presenza di neonati (Mann-Whitney U test: $U= 8.000$, $p<0.05$).

Per la macrocategoria B, è stato condotto un test di Kruskal-Wallis tra il numero di ripetizioni dell'elemento C e le 3 classi di *group size*. Dai risultati del test, e dal successivo test *post hoc* di Dunn, è emerso che il numero di ripetizioni dell'elemento C è maggiore in gruppi composti da più di 40 individui e minore in gruppi composti da 20-40 individui (K-W test: $\chi^2= 23.815$, $n= 211$, $df=2$, $p<0.05$) (Fig. 4.17 e Tab. 4.17).

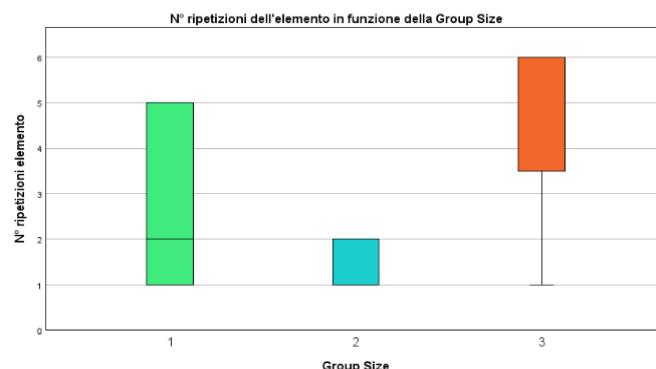


Figura 4.17 - Boxplot che mostra la variabilità del numero di ripetizioni dell'elemento C all'interno della macrocategoria B in relazione alla group size.

Tabella 4.17 - Risultati del test post hoc di Dunn per il confronto a coppie delle 3 categorie di group size.

Group size	Statistica del test	Errore std.	Statistica test std.	P-value
2-1	30.534	10.735	2.844	0.004
2-3	-86.229	17.763	-4.854	<0.001
1-3	-55.694	15.539	-3.584	<0.001

4.2.3.2 Contesto ambientale

Per quanto riguarda il contesto ambientale:

- La macrocategoria B in 100 (47.4%) casi è stata emessa in ambiente di canyon, mentre nei restanti 111 (52.6%) casi viene prodotta in ambiente pelagico;
- La macrocategoria EE viene emessa solo in ambiente pelagico;
- La macrocategoria U viene emessa 69 (75.8%) volte in ambiente di canyon e 22 (24.2%) volte in ambiente pelagico.

Il test di Mann-Whitney condotto tra il numero di ripetizioni dell'elemento, sia per la macrocategoria B che per la U, e la profondità del fondale, ha mostrato variazioni significative del parametro. In particolare, i risultati del test indicano che il numero di ripetizioni dell'elemento C (macrocategoria B) mostra i valori più elevati in ambiente pelagico (Mann-Whitney U test: $U= 4290$, $p<0.05$) (Fig. 4.18a), così come il numero di ripetizioni dell'elemento Cv (macrocategoria U) (Mann-Whitney U test: $U= 574.0$, $p<0.05$) (Fig. 4.18b).

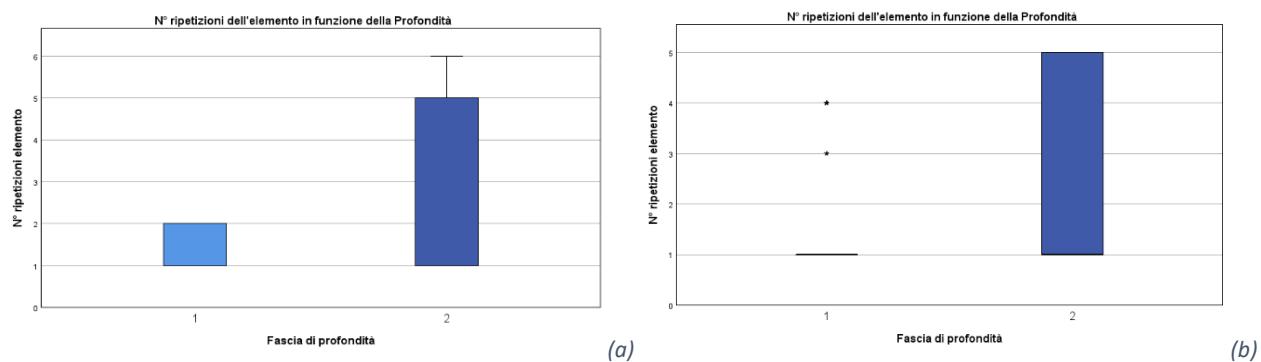


Figura 4.18 - Boxplot che mostrano la variabilità del numero di ripetizioni dell'elemento C (a) e Cv (b) in relazione alla fascia di profondità.

Sono stati calcolati gli *Emission Rate* medi per avvistamento considerando tutte le macrocategorie più frequenti, successivamente considerando solo le macrocategorie semplici e poi solo quelle complesse. È stata fatta un'analisi di correlazione con i test di Mann-Whitney e Kruskal-Wallis con i parametri sociali e con la profondità del fondale per valutare se ci fossero differenze tra le macrocategorie semplici e quelle complesse. I test non hanno mostrato variazioni significative del parametro.

Capitolo 5 – DISCUSSIONE

I suoni pulsati di globicefalo sono stati studiati in diverse aree del Nord Atlantico (Weilgart & Whitehead, 1990; Nemiroff & Whitehead, 2009; Vester *et al.*, 2017; Zwamborn & Whitehead, 2017) e nell’Oceano Indiano (Courts *et al.*, 2020) ma, ad oggi, la letteratura non riporta studi specifici riguardo i suoni pulsati di globicefalo nel Mar Mediterraneo. Questo studio fornisce una prima caratterizzazione dei suoni pulsati e dei suoni multicomponente registrati in occasione di avvistamenti avvenuti nella porzione occidentale del Santuario Pelagos (Mediterraneo nord-occidentale).

Nel presente lavoro sono stati estratti 2120 suoni pulsati dall’analisi di 34 registrazioni, raccolte in un arco temporale di 11 anni. L’analisi ha permesso l’identificazione di 33 diverse macrocategorie di suoni pulsati, la caratterizzazione dei principali parametri acustici dei suoni pulsati e l’esplorazione della variabilità acustica di questi suoni in relazione al contesto ambientale e sociale, al fine di indagarne la funzionalità.

I risultati emersi da questo lavoro mostrano come i suoni pulsati emessi nell’area del Santuario Pelagos condividano molte caratteristiche con quelli registrati in altre aree geografiche, ma mantengano caratteristiche distintive della popolazione in esame.

Categorie e macrocategorie

In questo studio, un’analisi acustica-visiva ha portato per la prima volta all’identificazione di 77 categorie poi raggruppate in 33 macrocategorie di suoni pulsati, aventi caratteristiche acustiche e strutturali ben distinguibili. Di queste 33, 16 macrocategorie, in particolare, sono state osservate più frequentemente di altre (>89.3%). La presenza di tipologie distinte di suoni nel repertorio di questa specie è stata riscontrata anche in altre aree geografiche (Courts *et al.*, 2020; Vester *et al.*, 2017), mentre nello studio condotto da Nemiroff & Whitehead (2009) in Nuova Scozia, non sono state riconosciute categorie distinte di suoni pulsati. Queste differenze osservate nel repertorio della specie nelle diverse aree potrebbero tuttavia essere dovute all’utilizzo di approcci metodologici differenti (ad esempio: una classificazione automatica in Nemiroff *et al.* (2009) rispetto a una classificazione acustica-visiva negli altri studi) e ad una differenza nella dimensione del campione analizzato (1591 nel presente studio, 2028 in Courts *et al.* del 2020, 4572 in Vester *et al.* del 2017 contro i 419 in Nemiroff & Whitehead del 2009) e pertanto, sottolineano il limite che l’adozione di approcci metodologici differenti pone quando si va a paragonare diverse popolazioni e di conseguenza l’importanza di sviluppare un approccio metodologico comune.

Inoltre, nonostante i suoni pulsati siano stati raggruppati in categorie allo scopo di descriverne le caratteristiche spettrali e temporali, ad oggi non ci sono informazioni sulla

loro funzione specifica. Ulteriori studi che mettano in evidenza somiglianze e divergenze tra le vocalizzazioni all'interno della specie, corredate da un maggior numero di informazioni sulla specie al momento dell'avvistamento, potrebbero far luce sull'utilizzo di determinate categorie di suoni pulsati, le cui caratteristiche acustiche potrebbero essersi funzionalmente adattate a determinati contesti, come già dimostrato per diversi tipi di vocalizzazioni in altre specie di odontoceti (vedi fischi e suoni per ecolocalizzazione).

I risultati di questo studio evidenziano che i suoni pulsati del globicefalo in quest'area sono strutturalmente complessi (in termini di numero e tipologie di elementi che li compongono), simili a quelli presenti nel repertorio acustico della specie in Nord Atlantico (Nemiroff & Whitehead, 2009; Vester *et al.*, 2017; Visser *et al.*, 2017; Zwamborn & Whitehead, 2017) e nell'Oceano Indiano (Courts *et al.*, 2020). La maggior parte dei suoni pulsati (41.3%) è risultata essere composta da 3 elementi, seguita da suoni composti da 4 elementi (25.5%) e da 2 elementi (16.2%). In minima parte (5.6%) i suoni pulsati sono composti da un solo elemento, mentre il restante 11.4% ha un numero di elementi che può variare da 5 (2.5%) a 19 (0.1%). Rispetto agli altri studi, vi sono lievi differenze nella descrizione dei suoni pulsati. In Nemiroff & Whitehead (2009), il numero di elementi che compongono un suono pulsato può variare da 1 a 6, con una media di circa 2 elementi per suono. In Vester *et al.* (2017), la maggior parte dei suoni pulsati contiene un solo elemento, con un massimo che può arrivare a 8.

Rispetto al numero di segmenti, in questo lavoro il 72.2% dei suoni pulsati è risultato essere costituito da 1 segmento, mentre il restante 27.8% da più di un segmento, variando tra 2 (21.0%) e 6 (0.7%). Questi risultati sono paragonabili a quelli ottenuti da Nemiroff & Whitehead (2009) (93%: 1 segmento) e da Vester *et al.* (2017) (87%: 1 segmento, il resto tra 2 e 6). La modulazione indipendente di più componenti (elementi) all'interno di ciascun suono, talvolta insieme alla presenza di una componente di frequenza superiore, suggerisce che i suoni pulsati possono trasmettere più informazioni all'interno di ciascun segnale (Bradbury & Vehrencamp ,1998; Hebets & Papaj, 2005).

Inoltre, nel presente lavoro, suoni pulsati aventi una struttura complessa, caratterizzata da tre o più tipologie di elementi differenti, sono stati riscontrati nella maggioranza dei casi (57.4%), mentre una struttura più semplice, composta da una o due tipologie di elementi diverse, ha caratterizzato la restante parte dei suoni (42.6%). La complessità dei suoni pulsati prodotti dal globicefalo rende questi suoni probabilmente difficili da comprendere e imitare da parte di altre specie e questo li rende dei segnali autentici per gli individui della stessa specie (Nemiroff & Whitehead, 2009). La loro emissione può offrire informazioni accurate sulla condizione del mittente stesso (Fitch & Hauser, 2003). Inoltre, lo stato comportamentale del mittente può svolgere un ruolo importante nella struttura del suono (Weilgart & Whitehead, 1990). Ad esempio, nelle orche l'aumento dell'eccitazione può

portare a variazioni estreme dei tipici suoni pulsati prodotti, suoni molto simili a quelli prodotti dal globicefalo (Ford 1989). Weilgart & Whitehead (1990) hanno ipotizzato l'esistenza di una relazione tra la tipologia di vocalizzazione emessa e il comportamento, secondo la quale le vocalizzazioni semplici vengono emesse durante i comportamenti di riposo e quelle complesse durante i comportamenti attivi in superficie.

Parametri acustici

- La durata dei suoni pulsati identificati nel presente studio si attesta in mediana su 0.93 secondi, con un minimo di 0.05 e un massimo di circa 2 secondi. Questo dato risulta più elevato rispetto a quanto riportato in letteratura per la specie in Nord Atlantico (0.17 -2.17 s, mediana 0.76 s: Nemiroff & Whitehead, 2009) e nell'Oceano Indiano (0.03 -2.07 s, mediana 0.37 s: Courts *et al.*, 2020).
- La frequenza minima in questo studio si attesta in mediana su valori di 1.083 Hz. Questo valore è al di sotto di quanto riportato nell'Oceano Indiano (3.464 Hz: Courts *et al.*, 2020) e in Nord Atlantico (1.289 Hz: Nemiroff & Whitehead, 2009).
- La frequenza massima ha un valore mediano di circa 18.541 Hz. Questo dato risulta al di sopra di quanto riportato in letteratura per la specie nell'Oceano Indiano (4.917 Hz: Courts *et al.*, 2020) e in Nord Atlantico (12.110 Hz: Nemiroff & Whitehead, 2009).
- La mediana del range di frequenza è di 17.204 Hz, che appare più alta rispetto ai valori osservati nel Nord Atlantico (10.706 Hz: Nemiroff & Whitehead, 2009).

Gli intervalli dei valori dei parametri acustici misurati nel presente studio sono simili a quelli pubblicati per le orche, le quali mostrano un comportamento acustico e una struttura sociale simili a quelli del globicefalo. Le orche sembrano però avere suoni pulsati con una durata leggermente più breve (0.5-1.5 s: Ford 1987) e frequenze più basse (1-12 kHz: Ford 1987; Hoelzel and Osborne 1986). Le variazioni dei parametri acustici riscontrate in questo studio potrebbero essere la conseguenza di diversi fattori, considerando che le caratteristiche delle vocalizzazioni posso variare a seconda dello stato emotivo, delle condizioni fisiologiche, del comportamento, dell'area geografica e della presenza di rumore (Courts *et al.*, 2020; Rendell *et al.*, 1999). Si è dimostrato come il globicefalo sia una specie estremamente sensibile ai rumori di natura antropica, come il traffico navale e i sonar (Alves *et al.*, 2013; Arranz *et al.*, 2021; Nemiroff & Whitehead, 2009; Rendell *et al.*, 1999; Visser *et al.*, 2017). Si potrebbe quindi ipotizzare che l'aumento osservato dei parametri di frequenza e durata sia una strategia adottata allo scopo di consentire una comunicazione efficace in un ambiente estremamente rumoroso, come è stato osservato in altre specie di cetacei (Au *et al.*, 1985; Lesage *et al.*, 1999; May-Collado & Wartzok 2008). È stato spesso osservato, infatti, come in presenza di sonar i globicefali aumentino il numero di vocalizzazioni emesse e mettano in atto diverse strategie di evitamento, aumentando il tempo che passano in acque superficiali e riducendo l'attività di foraggiamento (Visser *et al.*, 2017). L'area di studio è interessata da un'intensa attività antropica, che si accentua soprattutto nella stagione estiva

in quanto meta turistica. L'entità del traffico navale è consistente e sono numerose le tipologie di imbarcazioni (ad esempio mercantili, traghetti, imbarcazioni da diporto, ecc..) che transitano all'interno del Santuario (Notarbartolo di Sciara *et al.*, 2008), indicando che questa popolazione potrebbe essere soggetta ad un rumore di fondo molto elevato (Rendell *et al.*, 1999). Inoltre, è noto come popolazioni che abitano differenti aree geografiche possano mostrare differenze nelle loro vocalizzazioni (Rendell *et al.*, 1999). Infatti, si è osservato in diverse specie come i parametri acustici delle vocalizzazioni possano variare in base al contesto sociale, a quello ambientale e in funzione dell'attività svolta (Heiler *et al.*, 2016; Rendell *et al.*, 1999; Visser *et al.*, 2017). Ad esempio, i globicefali producono vocalizzazioni più modulate durante l'attività di foraggiamento (Taruski 1979; Visser *et al.*, 2017) e si è visto che i suoni pulsati vengono prodotti in misura significativamente maggiore durante i comportamenti attivi o quando sono in stato di eccitazione, indicando una possibile funzione di coesione del gruppo (Weilgart e Whitehead, 1990). Inoltre, si ipotizza che la variazione dei parametri dei suoni pulsati possa riflettere la comunicazione da parte di un individuo di stati comportamentali diversi o l'appartenenza ad un gruppo (Nemiroff & Whitehead, 2009).

È tuttavia importante sottolineare come le differenze tra questo e gli altri studi condotti sulla specie potrebbero in parte essere causate da una differenza nelle dimensioni campionarie del dataset utilizzato per le analisi. I precedenti studi, infatti, hanno analizzato un numero di vocalizzazioni molto più elevato di quello utilizzato in questo lavoro, portando quindi ad un risultato possibilmente più completo.

Componente ad alta frequenza (HFC)

- La frequenza iniziale media delle componenti ad alta frequenza identificate in questo studio è di circa 7.918 Hz, simile a quella misurata per la specie in Nord Atlantico (7.598 Hz: Nemiroff & Whitehead, 2009).
- La frequenza finale si attesta in mediana su un valore di circa 9.078 Hz. Questo valore risulta essere più elevato di quanto riportato in letteratura per la specie, con una frequenza finale pari in media a 7.019 Hz (Nemiroff & Whitehead, 2009).
- I punti di inflessione della componente HFC si attestano in media su valori di 3.24. Valori più contenuti sono riportati per la specie in Nord Atlantico (2.15 in media: Nemiroff & Whitehead, 2009).
- La durata media della componente HFC è 0.55 s, con un minimo di 0.06 s e un massimo di 1.26 s. Questi valori sono simili a quanto riportato da Nemiroff & Whitehead (2009) (0.60 s in media, 0.1-1.5 s).
- La mediana della frequenza minima è 6.127 Hz, la frequenza massima ha un valore mediano di circa 10.429 Hz e il range di frequenza si attesta in mediana su valori di circa 4.406 Hz. Il range di frequenza riportato da Nemiroff & Whitehead (2009) per la specie in Nord Atlantico è di 2.6-16 kHz.

La presenza di bifonie è stata descritta in diversi taxa di mammiferi, tra cui primati, canidi e cetacei (Wellard *et al.*, 2020). Nei mammiferi, si ritiene che questi segnali possano aiutare il riconoscimento dell'identità (Kaplan *et al.*, 2018; Papale *et al.*, 2015; Volodina *et al.*, 2006). Confrontando i valori dell'HFC misurati in questo lavoro con quelli delle orche, si nota una certa similarità; le orche sembrano però avere HFC leggermente più lunghe (0.5-2.5 s: Schevill and Watkins 1966). In Nemiroff & Whitehead (2009), le misurazioni dell'HFC coincidono con i valori più alti dei dati riportati in letteratura sui fischi del globicefalo in Nord Atlantico (Rendell *et al.*, 1999). Nel presente studio, il 39.3% dei suoni pulsati sono risultati essere delle bifonie, ovvero suoni pulsati con componenti HFC simultanee e modulate in modo indipendente, equivalenti a suoni tonali ad alta frequenza. La presenza di bifonie nel repertorio acustico di questa specie è stata documentata anche nell'Oceano Indiano (Courts *et al.*, 2020) e in Nord Atlantico (Nemiroff & Whitehead, 2009; Vester *et al.*, 2017). Rispetto ai precedenti studi, i suoni pulsati bifonici rappresentano una parte più rilevante del repertorio analizzato (20% in Nemiroff & Whitehead (2009), 29% in Vester *et al.*, 2017). Sebbene la funzione della bifonie non sia nota, la loro presenza all'interno di una popolazione suggerisce una possibile funzione comunicativa (Nemiroff & Whitehead, 2009; Wellard *et al.*, 2020). L'elevata percentuale di questi suoni emersa da questo studio suggerisce che la HFC potrebbe rivestire un ruolo importante nella comunicazione dei globicefali in Mediterraneo e meriterebbe di essere approfondito attraverso la raccolta di dati comportamentali (ad esempio subacquei o da drone). Si ipotizza che la presenza di due componenti modulate in modo indipendente all'interno di un suono potrebbe consentire ai mittenti di trasmettere molteplici informazioni, tra cui l'identità, lo status e la condizione ai potenziali compagni (Hebets & Papaj, 2005; Yurk, 2005). Inoltre, è stato suggerito come la combinazione di più componenti possa aumentare la probabilità di riconoscimento della vocalizzazione, fondamentale per la comunicazione a lunga distanza in ambienti rumorosi (Filatova *et al.*, 2009; Nemiroff & Whitehead, 2009). Nelle orche (Filatova *et al.*, 2009; Foote *et al.*, 2008) si è osservato che i suoni bifonici sono maggiormente prodotti quando gli animali si trovano in gruppi composti da membri di diversi *pod*. Ciò suggerisce che la composizione del gruppo influisce sull'uso di tali suoni e che le bifonie sono probabilmente utilizzate per identificare l'appartenenza al *pod* e al gruppo matrilineare. In uno studio effettuato sulle stenelle striate nel Golfo di Taranto (Papale *et al.*, 2020), la presenza di bifonie è stata rilevata maggiormente durante le attività di socializzazione e nei viaggi, durante i quali aumenterebbe la necessità di mantenere il contatto tra gli individui. Come per i mammiferi terrestri, i suoni bifonici potrebbero compensare la difficoltà di percepire gli stimoli visivi, aiutando l'identificazione tra gli individui all'interno di grandi gruppi (Papale *et al.*, 2020). Sarebbe utile approfondire questo aspetto anche nella popolazione di globicefalo presa in esame al fine di comprendere meglio la funzione dei suoni bifonici nella specie. Un altro risultato ottenuto in questo lavoro è che la durata dei suoni pulsati sembra essere

significativamente più lunga quando è presente la componente ad alta frequenza. Anche in Nord Atlantico (Nemiroff & Whitehead, 2009) la presenza dell'HFC è risultata essere correlata alla durata di un suono, tanto che i suoni con una HFC sembrano essere più lunghi rispetto a quelli senza HFC.

Contesto sociale

I risultati di questo lavoro hanno mostrato che nei suoni pulsati di globicefalo è possibile riscontrare variazioni dei parametri acustici e della struttura in relazione ai diversi contesti di emissione. Lo studio di Nemiroff & Whitehead (2009) condotto sulla stessa specie in Nord Atlantico, suggerisce che la dimensione del gruppo e la sua composizione possano influenzare la struttura o le tipologie di vocalizzazioni prodotte. In questo studio, la suddivisione dei suoni pulsati per *group size* ha evidenziato, infatti, come la variazione del numero di individui sembrerebbe associato ad una variazione delle caratteristiche acustiche delle vocalizzazioni emesse dagli animali. In particolare, è emerso che la frequenza massima diminuisce all'aumentare della *group size*, mentre la frequenza minima aumenta. Inoltre, nei gruppi meno numerosi, il numero di elementi sembra mostrare i valori più bassi, così come il numero di segmenti e il numero di ripetizioni dell'elemento C, per la macrocategoria B, sembrerebbero aumentare con la *group size*. L'aumento della frequenza minima, del numero di segmenti e del numero di ripetizioni degli elementi all'aumentare della *group size*, potrebbe rappresentare una strategia per garantire una più efficace trasmissione delle informazioni in condizioni di elevata numerosità degli individui. Nemiroff & Whitehead (2009) hanno ipotizzato che la variazione della struttura dei suoni pulsati sia influenzata soprattutto dal gruppo sociale che li produce e dal comportamento del gruppo durante l'avvistamento. Inoltre, uno studio effettuato sulle orche (Ford, 1989) suggerisce che le variazioni nella struttura dei suoni pulsati potrebbero avere molteplici funzioni: indicare l'appartenenza a un gruppo, coordinarne il comportamento durante il foraggiamento, creare legami all'interno del gruppo e, probabilmente, a identificare gli individui.

Nel presente studio emerge che la frequenza iniziale della componente HFC diminuisce all'aumentare della *group size*. La durata diminuisce nei gruppi meno numerosi, mentre la frequenza minima, la frequenza iniziale e la mediana del numero di punti di inflessione aumentano. La frequenza massima e il range di frequenza non sembrano subire variazioni significative.

Un altro aspetto di carattere sociale considerato in questo studio è la presenza di piccoli e di neonati. È stato osservato, infatti, come la presenza di piccoli sia un fattore condizionante che sembrerebbe influenzare le caratteristiche acustiche delle vocalizzazioni di diverse specie (Kriesell *et al.*, 2014; Sayigh *et al.*, 1990; Sayigh *et al.*, 2023; Weiss *et al.*, 2006). In questo studio è emerso che in presenza di piccoli e di neonati, i parametri acustici dei suoni pulsati

subiscono variazioni: la durata diminuisce, la frequenza minima aumenta, mentre la frequenza massima e il range di frequenza non sembrano subire significative variazioni. In presenza di piccoli, il numero di elementi non mostra differenze significative, mentre il numero di segmenti è maggiore. Inoltre, si è visto come il numero di ripetizioni di un tipo di elemento (elemento C) sia più elevato all'aumentare del numero di piccoli. In presenza di neonati il numero di elementi è più elevato, mentre risultano minori il numero di segmenti e il numero di ripetizioni di un tipo di elemento (elemento Cv), per la macrocategoria classificata come U. Questi risultati sono in linea con quanto ipotizzato da Nemiroff & Whitehead (2009), i quali suggeriscono come il numero di piccoli possa influenzare la struttura dei suoni pulsati. È stato dimostrato che anche i capodogli adulti alterano i loro suoni in presenza di un piccolo, il che potrebbe riflettere la maggiore necessità che madre e piccolo siano in grado di localizzarsi a vicenda e di garantire un trasferimento efficiente del latte (Schulz, 2007). In un lavoro condotto sul tursiope (Sayigh *et al.*, 2023) si è scoperto che le femmine adulte, in presenza di piccoli, producono fischi firma con frequenze massime significativamente più alte e frequenze minime leggermente più basse, con un range di frequenze più ampio. Queste differenze sono in linea con quanto osservato negli umani e potrebbero avere la funzione di promuovere l'attenzione, il legame madre-piccolo e l'apprendimento vocale nei piccoli, come avviene nei bambini umani. In questo studio, la diminuzione della durata e l'aumento della frequenza minima dei suoni potrebbero essere legate ad una facilitazione della comunicazione madre-piccolo. L'aumento del numero di segmenti, del numero di ripetizioni dell'elemento in presenza di piccoli e del numero di elementi in presenza di neonati, potrebbero avere la stessa funzione.

Nel presente studio è stata considerata un'ulteriore variabile di carattere sociale, la presenza di giovani. Quello che è emerso è che, in presenza di giovani, il numero di elementi mostra i valori più bassi, mentre il numero di segmenti risulta più elevato. La frequenza minima, la frequenza iniziale, la frequenza finale e il numero di punti di inflessione della componente HFC aumentano in presenza di giovani. La durata, la frequenza massima e il range di frequenza non mostrano differenze significative in presenza di giovani.

Contesto ambientale

Nel presente lavoro è stata anche analizzata la variabilità dei suoni pulsati in relazione alle caratteristiche ambientali dell'area di studio. La diversità dei suoni può riflettere una plasticità comunicativa che facilita l'adattamento in un ambiente variabile (Nemiroff & Whitehead, 2009). Le caratteristiche ambientali e il paesaggio sonoro di una determinata area possono influenzare notevolmente il repertorio acustico delle specie che la abitano (Pijanowski *et al.*, 2011). In questo studio è emersa una significativa differenza in alcuni parametri acustici dei suoni pulsati rispetto ai due habitat considerati (canyon e pelagico). In particolare, la durata dei suoni pulsati diminuisce in habitat di canyon, mentre la

frequenza minima aumenta. La zona di canyon nell'area di studio risulta essere interessata da un intenso traffico marittimo (soprattutto per la presenza di rotte mercantili) e da alcune attività di *whale watching* nonché da attività di diporto turistico (Notarbartolo di Sciara *et al.*, 2008). Le differenze nei parametri acustici osservate nei globicefali nei diversi habitat potrebbero essere imputabili ad alterazione indotta dal rumore ambientale come osservato in altre specie di cetacei, i quali modulano la frequenza e la durata dei loro segnali per superare le interferenze del rumore sottomarino (Au *et al.*, 1985; Lesage *et al.*, 1999; May-Collado e Wartzok 2008). Il numero di elementi e il numero di segmenti invece non sembrano subire significative variazioni in relazione all'habitat. Il numero di ripetizioni degli elementi all'interno delle macrocategorie considerate sembra essere più elevato in ambiente pelagico. Questo potrebbe essere legato alla presenza di piccoli, anche se in entrambi gli habitat sono stati registrati i suoni pulsati in presenza di piccoli (6 registrazioni in ambiente di canyon e 8 registrazioni in ambiente pelagico).

Queste differenze potrebbero comunque derivare, come già detto prima, da una differenza nei livelli di rumore tra le due zone, con l'habitat di canyon (più prossimo alla costa) maggiormente soggetto ad attività antropica e quindi presumibilmente rumoroso. È stato infatti osservato in altre aree come i globicefali modifichino il proprio comportamento in presenza di sonar e di imbarcazioni, attuando risposte di fuga o di difesa, probabili indicatori di uno stato di allerta o di stress (Arranz *et al.*, 2021). Dai risultati di questo studio, inoltre, emerge che la durata e il numero di punti di inflessione della componente HFC aumentano in habitat di canyon, mentre la frequenza minima, la frequenza iniziale e la frequenza finale diminuiscono. La frequenza massima e il range di frequenza non sembrano mostrare variazioni significative. Studi effettuati sui fischi dei tursiopi (Ding *et al.*, 1995; Douaze *et al.*, 1997) suggeriscono che una durata più elevata e un maggior numero di inflessioni sono associate ad aree con un rumore di fondo più elevato. L'aumento della durata e del numero di punti di inflessione riscontrati in questo studio potrebbero quindi essere legati al rumore di fondo presente nei diversi habitat. I livelli di rumore nell'area di studio nei diversi habitat non sono noti e ulteriori approfondimenti permetterebbero di comprendere meglio come il rumore potrebbe influire sul comportamento acustico delle specie di cetacei.

Catene Markoviane

In questo studio, all'interno del repertorio acustico del globicefalo, è stata rilevata la presenza di ripetizioni in sequenza di stesse tipologie di suoni pulsati e di accoppiamenti di diverse tipologie. La ripetizione e la combinazione di tipologie di suoni sono state documentate in diversi studi condotti sul globicefalo, in particolare in Nord Atlantico e nell'Oceano Indiano. In Nord Atlantico (Vester *et al.*, 2017; Zwamborn & Whitehead, 2017), nel repertorio di questa specie, sono state identificate diverse combinazioni di tipologie di

suoni ripetute in sequenza e con intervalli di tempo variabili, tali da conferirgli una natura ritmica. Le ragioni di questa ripetitività sono attualmente sconosciute, ma sono state formulate diverse ipotesi a riguardo. La ripetizione potrebbe aiutare la comunicazione in ambienti rumorosi o il mantenimento del contatto e della coesione del gruppo (Courts *et al.*, 2020; Nemiroff & Whitehead, 2009; Zwamborn & Whitehead 2017). Nella ripetizione di uno stesso segnale, che forma una sequenza vocale, possono essere importanti il numero di ripetizioni e la lunghezza della pausa tra queste (Selbmann *et al.*, 2023). Ad esempio, in alcuni primati il numero di ripetizioni dei segnali e l'ordine in cui questi vengono emessi codifica contesti diversi, e in diverse specie di mammiferi la frequenza dei segnali di allarme aumenta con l'urgenza della comunicazione (Selbmann *et al.*, 2023). Il numero di suoni diversi, l'ordine o i tempi con cui vengono emessi forniscono informazioni diverse e suscitano risposte diverse da parte dei conspecifici (Selbmann *et al.*, 2023). Si è ipotizzato che la combinazione di tipologie di suoni possa avere un ruolo nell'identificazione degli individui o del gruppo sociale di appartenenza (Zwamborn & Whitehead, 2017). Queste combinazioni miste possono variare da semplici combinazioni di due suoni a manifestazioni complesse come il canto degli uccelli o delle balene, con più unità distinte (Selbmann *et al.*, 2023). Nelle specie altamente sociali come il globicefalo, la combinazione di diverse tipologie di suoni e un'elevata ripetitività dovrebbero favorire un'elevata complessità comunicativa. Negli odontoceti, diverse specie sono note per produrre vocalizzazioni ripetute: il globicefalo (Courts *et al.*, 2020; Zwamborn & Whitehead, 2017) e il globicefalo di Gray (*Globicephala macrorhynchus*) (Sayigh *et al.*, 2013), la stenella maculata atlantica (*Stenella frontalis*), il tursiope (*Tursiops truncatus*) (Herzing 2015), il peponocefalo (*Peponocephala electra*) (Kaplan *et al.*, 2014) e le orche (Miller *et al.*, 2004; Selbmann *et al.*, 2023). Nelle orche sono state rilevate combinazioni di tipologie di suoni specifiche in alcuni studi condotti nel Pacifico settentrionale (Ford 1991; Saulitis *et al.*, 2005). I suoni delle orche tendono a essere ripetuti e queste ripetizioni possono essere fatte dallo stesso individuo o insieme ad altri individui (Ford 1989; Miller *et al.*, 2004). È stato dimostrato che il comportamento e la dimensione del gruppo influenzano la presenza delle sequenze di suoni ripetuti (Zwamborn & Whitehead, 2017); un numero maggiore di individui implica una maggiore necessità di coordinamento e identificazione, soprattutto a livello individuale (Bradbury & Vehrencamp 2011; Tyack 2000). La stessa ipotesi è stata formulata da Sayigh *et al.* (2013) nel loro studio sul globicefalo di Gray; i ricercatori suggeriscono che i suoni all'interno di sequenze ripetute potrebbero avere la funzione di un'identificazione individuale simile ai fischi di firma trovati in altre specie di delfinidi, o di un'identificazione specifica dell'unità, come quelli prodotti in altre specie matrilineari come le orche (Ford 1989) o i capodogli (Gero *et al.*, 2016). In una struttura sociale nella quale gli individui formano gruppi stabili a lungo termine, è probabile che siano auspicabili identificatori a livello individuale o di gruppo. Per determinare se la ripetizione in sequenza dei suoni possa funzionare nell'identificazione e

se ciò avvenga a livello individuale o di gruppo, sono necessari ulteriori studi che categorizzino questi suoni all'interno di ripetizioni per gruppi specifici incontrati ripetutamente. Un'altra ipotesi è che i suoni all'interno di sequenze ripetute potrebbero anche funzionare come una forma di richiamo di contatto (Zwamborn & Whitehead 2017). Nello studio di Zwamborn & Whitehead (2017), le sequenze ripetute sono state emesse con una frequenza maggiore durante le attività di socializzazione, con una frequenza moderata durante il foraggiamento e gli spostamenti e con una frequenza bassa durante il riposo. Queste osservazioni supportano il loro ruolo nel coordinamento e nella coesione del gruppo, funzioni fondamentali in quanto quando diversi gruppi di globicefalo si uniscono, si può creare un ambiente apparentemente caotico.

Conclusioni

In conclusione, questo lavoro ha permesso di caratterizzare per la prima volta i suoni pulsati e i suoni multicomponente della sottopopolazione di globicefalo del Mediterraneo centrale, in particolare nell'area del Santuario Pelagos, estraendone i parametri acustici e descrivendone quantitativamente le caratteristiche strutturali. La definizione dei parametri acustici che contraddistinguono questa specie è un importante strumento per migliorarne la tutela (ad esempio comprendendo come le attività antropiche, ad esempio le attività di *whale watching*, potenzialmente alterano il comportamento della specie e attuando regolamentazioni *ad hoc*). La determinazione dei range di frequenza più sensibili per questa specie contribuirebbe infatti a migliorare l'efficacia delle direttive che verranno emanate per la gestione del rumore. Inoltre, la specificità nella struttura delle vocalizzazioni ha permesso di definire categorie distinte di suoni pulsati e multicomponente della popolazione nell'area indagata. L'elevata variabilità strutturale, insieme alla ripetizione e alla combinazione delle tipologie di suoni, richiederebbero un'indagine più approfondita allo scopo di comprendere la loro funzione nella comunicazione di questa specie. Infine, si è compreso che i contesti sociale e ambientale sembrerebbero influenzare i parametri acustici del globicefalo, fornendo un'informazione importante per ampliare la conoscenza del comportamento acustico di questa specie.

APPENDICE

Tabella A.1 - Tabella che illustra un riepilogo delle quantità di elementi e di segmenti e delle tipologie di elementi che costituiscono le 77 categorie di suoni pulsati.

Categoria	Numero di Elementi	Numero di Segmenti	Tipologie di Elementi
A	1	1	A
B	3	2	C+C+HFC
B1	2	2	C+HFC
B2	1	1	HFC
B3	2	1	C+HFC
B4	4	2	B+B+C+C+HFC
C	4	4	A+Cv+Cv+D
C1	3	3	A+Cv+Cv
D	4	4	A+C+Cv+C
E	3	1	A+Cx+D
F	2	1	A+D
G	1	1	D
H	2	1	A+C
I	3	1	A+D+C
J	5	1	A+Cx+D+Cv+A
K	1	1	C
K1	2	2	C+HFC
K11	4	2	C+B+C+HFC
L	4	1	Cv+C+A+HFC
M	2	1	Cx+HFC
N	2	1	A+Cx
O	6	5	C+C+C+C+C+HFC
P	3	1	A+Cv+C
Q	2	2	C+HFC
R	4	1	A+Cx+C+HFC
S	3	1	C+A+D
T	2	1	A+HFC
U	4	2	C+Cv+Cx+C
U1	2	1	Cx+C
V	3	1	A+Cx+C
W	6	1	A+Cx+Cv+D+C+HFC
X	4	1	A+Cx+A+HFC
Y	4	1	A+D+C+HFC
Z	6	1	A+C+D+Cv+D+HFC
AA	4	1	A+Cv+Cx+D
BB	2	1	C+A
CC	5	1	A+Cx+Cx+Cx+D
DD	3	1	Cv+A+HFC
EE	1	1	Cv
FF	4	1	B+A+Cx+D
GG	2	1	B+A
HH	3	1	B+Cx+A

II	10	1	A+Cx+Cv+Cx+Cv+Cx+Cv+Cx+Cv+Cx
JJ	3	1	C+Cx+C
KK	2	1	C+HFC
LL	4	1	Cv+Cv+Cv+C
MM	4	1	Cv+D+Cv+C
NN	4	1	C+Cx+C+A
OO	4	1	B+Cv+Cx+A
PP	5	1	Cv+Cv+Cv+C+A
QQ	2	1	C+HFC
QQ1	5	4	Cv+Cv+Cv+Cv+HFC
RR	3	1	B+A+HFC
SS	3	1	A+D+C
TT	3	1	C+C+A
UU	10	1	B+Cv+Cx+Cv+Cx+Cv+Cx+Cv+Cx+Cv
VV	4	1	Cv+Cx+D+HFC
WW	3	2	Cv+A+Cv
XX	3	1	D+Cx+C
YY	4	1	Cv+Cx+C+HFC
ZZ	4	1	Cx+C+A+C
AAA	11	1	Cv+Cx+Cv+Cx+Cv+Cx+Cv+Cx+Cv+Cx+Cv
BBB	2	2	A+Cv
CCC	4	2	A+C+D+HFC
DDD	6	5	Cv+Cv+Cv+Cv+Cv+HFC
EEE	3	1	C+A+HFC
FFF	4	1	A+Cx+D+HFC
GGG	7	6	C+C+C+C+C+HFC
HHH	3	1	Cx+D+C
III	3	1	C+Cx+A
JJJ	2	1	A+HFC
KKK	4	2	Cv+C+A+HFC
LLL	4	2	D+D+D+HFC
MMM	4	4	Cv+Cv+Cv+Cv
NNN	2	1	Cv+HFC
OOO	2	2	Cv+D
PPP	2	2	A+HFC

Tabella A.2 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria A (N= 19).

Parametro	Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
Media	1.22	579.4	14442.6	13863.3
Errore std.	0.051	68.11	950.24	930.7
I.C. 95%	1.11-1.32	436.3-722.5	12446.2-16439	11908-15818.5
Mediana	1.24	480	13848.9	13413.9
Minimo	0.84	222.2	8283.2	7858.41
Massimo	1.62	1208.7	27484.9	26654.9
Deviazione std.	0.223	296.9	4142	4056.71

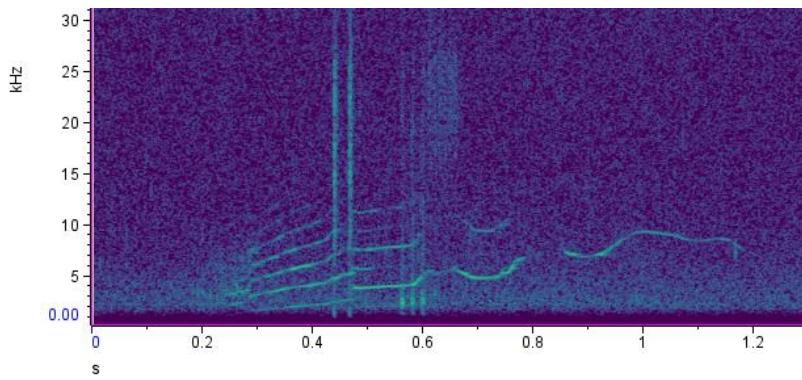


Figura A.1 - Spettrogramma di un suono pulsato (con HFC) appartenente alla macrocategoria A.

Tabella A.3 - Parametri acustici calcolati per il suono pulsato di buona qualità appartenente alla macrocategoria AA (N= 1).

Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
1.32	1538.41	19807	18268.6

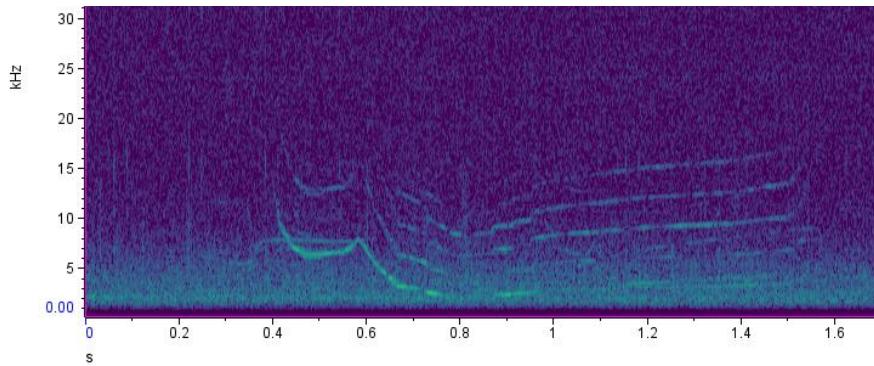


Figura A.2 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria AA.

Tabella A.4 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria B (N= 29).

Parametro	Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
Media	0.91	1513.74	17399.26	15885.52
Errore std.	0.04	122.51	1146.73	1143.16
I.C. 95%	0.83-0.98	1262.8-1764.7	15050.3-19748.2	13543.9-18227
Mediana	0.93	1380.82	18828.73	16479.7
Minimo	0.47	463.02	9696.28	8228.57
Massimo	1.22	2735.69	31033.30	29675.7
Deviazione std.	0.20	659.76	6175.33	6156.1

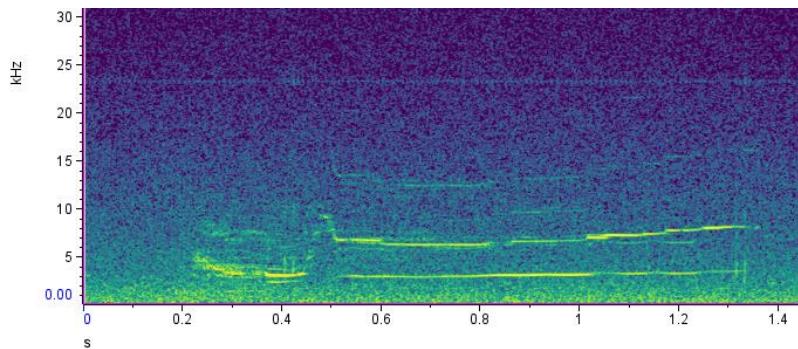


Figura A.3 - Spettrogramma di un suono pulsato (con HFC) appartenente alla macrocategoria B.

Tabella A.5 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria BB (N= 9).

Parametro	Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
Media	0.99	1226.60	16768.53	15541.93
Errore std.	0.04	83.19	813.15	851.59
I.C. 95%	0.89-1.09	1034.8-1418	14893.4-18643.7	13578.2-17505.7
Mediana	1.00	1163.64	17114.79	15781.82
Minimo	0.81	942.81	12320.48	10507.60
Massimo	1.19	1812.88	20232.31	19003.25
Deviazione std.	0.13	249.58	2439.45	2554.76

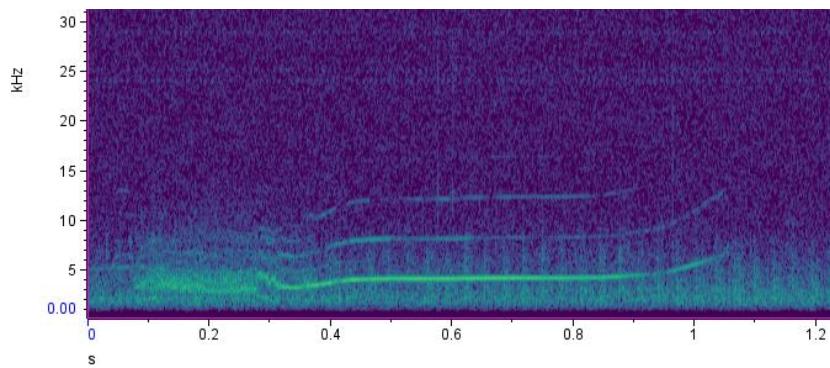


Figura A.4 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria BB.

Tabella A.6 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria C (N= 3).

Parametro	Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
Media	0.78	5758.43	16805.32	11046.89
Errore std.	0.01	109.97	1876.32	1981.01
I.C. 95%	0.72-0.84	5285.3-6231.6	8732.2-24878.5	2523.3-19570.5
Mediana	0.78	5842.33	15568.44	9675.88
Minimo	0.76	5540.40	14355.49	8513.16
Massimo	0.81	5892.56	20492.03	14951.63
Deviazione std.	0.02	190.48	3249.88	3431.21

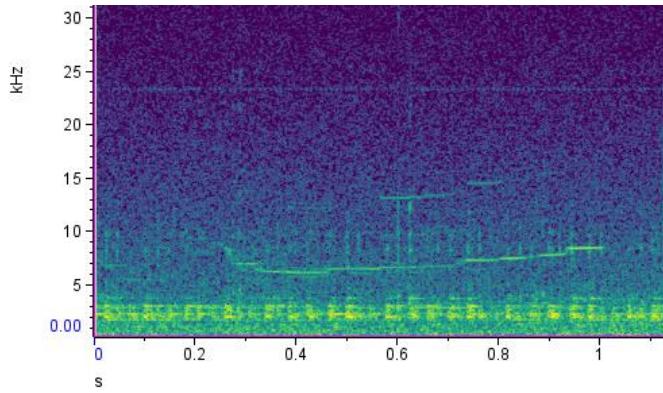


Figura A.5 - Spettrogramma di una componente HFC appartenente alla macrocategoria C.

Tabella A.7 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria CC (N= 5).

Parametro	Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
Media	1.33	1103.74	28665.72	27561.98
Errore std.	0.10	68.95	3530.52	3534.58
I.C. 95%	1.06-1.6	912.3-1295.2	18863.4-38468	17748.4-37375.5
Mediana	1.44	1144.10	27053.04	25973.09
Minimo	1.08	862.90	20145.46	18859.81
Massimo	1.55	1285.65	41493.70	40349.60
Deviazione std.	0.22	154.18	7894.47	7903.56

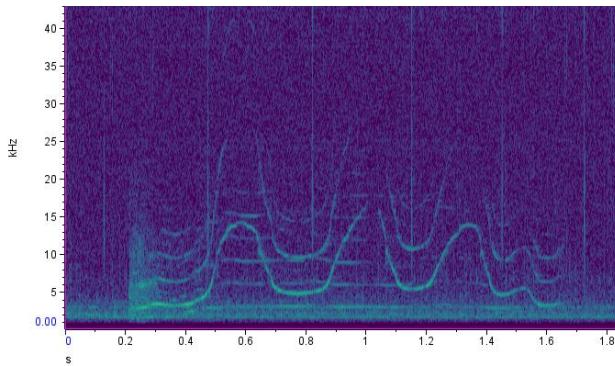


Figura A.6 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria CC.

Tabella A.8 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria D (N= 4).

Parametro	Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
Media	0.80	1383.37	11472.12	10088.75
Errore std.	0.05	152.25	189.31	286.95
I.C. 95%	0.63-0.96	898.8-1867.9	10869.6-12074.6	9175.6-11001.9
Mediana	0.80	1468.44	11387.42	10096.94
Minimo	0.68	973.72	11113.64	9490.77
Massimo	0.92	1622.87	12000	10670.36
Deviazione std.	0.10	304.51	378.62	573.89

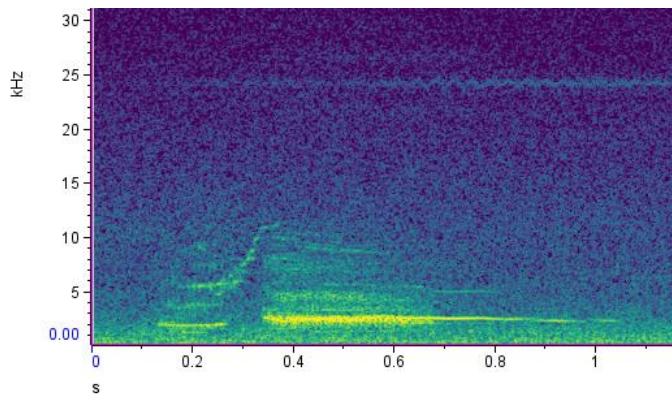


Figura A.7 - Spettrogramma di un suono pulsato (con HFC) appartenente alla macrocategoria D.

Tabella A.9 - Parametri acustici calcolati per il suono pulsato di buona qualità appartenente alla macrocategoria DD (N= 1).

Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
1.18	1263.2	15038.2	13775

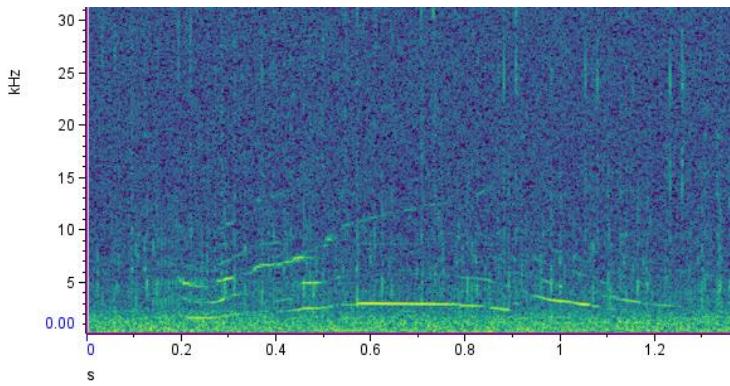


Figura A.8 - Spettrogramma di un suono pulsato (con HFC) appartenente alla macrocategoria DD.

Tabella A.10 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria E (N= 6).

Parametro	Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
Media	0.88	612.77	12071.40	11458.63
Errore std.	0.03	70.94	1640.94	1679.91
I.C. 95%	0.81-0.94	430.4-795.1	7853.2-16289.6	7140.3-15777
Mediana	0.86	603.99	11669.22	11003.64
Minimo	0.81	368.93	6806.62	6162.75
Massimo	0.98	873.82	17208.79	16695.94
Deviazione std.	0.06	173.77	4019.47	4114.92

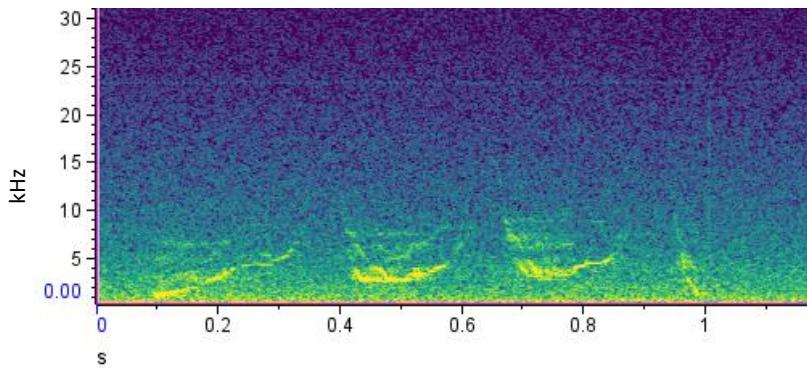


Figura A.9 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria E.

Tabella A.11 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria EE (N= 10).

Parametro	Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
Media	0.81	2302.47	16875.77	14573.30
Errore std.	0.02	93.25	571.86	561.76
I.C. 95%	0.77-0.86	2091.5-2513.4	15582.1-18169.4	13302.5-15844.1
Mediana	0.81	2308.25	16615.96	14443.06
Minimo	0.74	1734.94	14175.82	11485.37
Massimo	0.94	2690.46	19573.65	17072.24
Deviazione std.	0.06	294.87	1808.38	1776.45

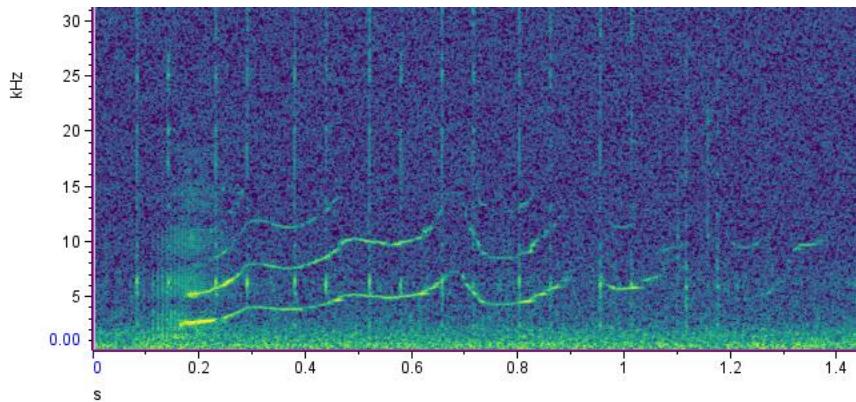


Figura A.10 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria EE.

Tabella A.12 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria F (N= 9).

Parametro	Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
Media	1.13	869.24	20483.20	19613.96
Errore std.	0.07	159.17	2986.41	3040.36
I.C. 95%	0.97-1.3	502.2-1236.3	13596.5-27369.9	12602.9-26625
Mediana	1.19	1000	19081.13	18885.48
Minimo	0.66	195.65	6196.34	5456.48
Massimo	1.33	1662.05	33161.22	32895.29
Deviazione std.	0.22	477.51	8959.24	9121.09

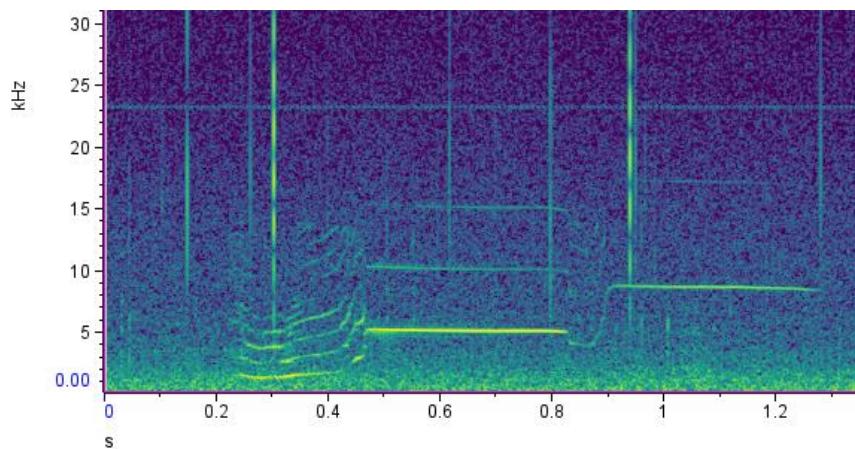


Figura A.11 - Spettrogramma di un suono pulsato (con HFC) appartenente alla macrocategoria F.

Tabella A.13 - Parametri acustici calcolati per il suono pulsato di buona qualità appartenente alla macrocategoria FF (N= 1).

Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
0.99	983.80	6767.72	5783.92

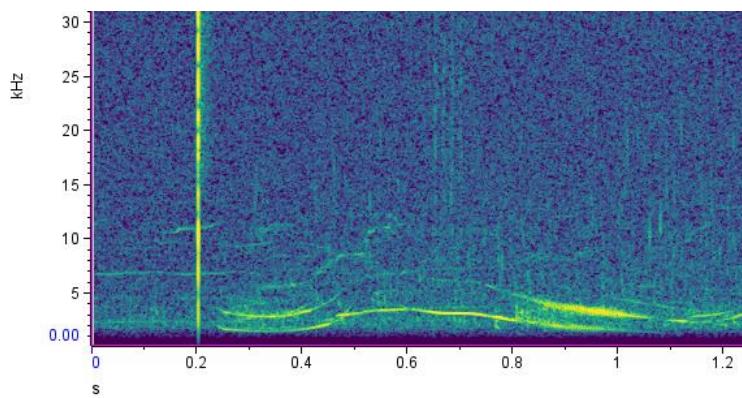


Figura A.12 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria FF.

Tabella A.14 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria G (N= 14).

Parametro	Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
Media	0.94	1171.97	22156.59	20984.62
Errore std.	0.03	183.03	1395.17	1411.38
I.C. 95%	0.87-1.01	776.57-1567.4	19142.5-25170.7	17935.5-24033.7
Mediana	1.00	1176.02	22737.33	21537.76
Minimo	0.66	272.99	12244.90	11971.91
Massimo	1.07	2828.43	28406.06	26342.37
Deviazione std.	0.12	684.82	5220.23	5280.90

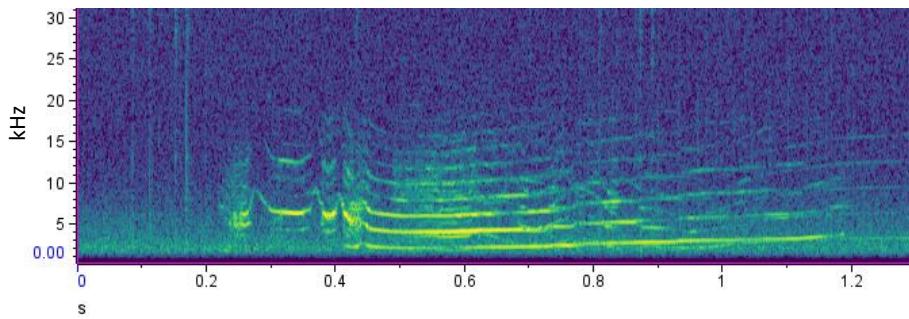


Figura A.13 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria G.

Tabella A.15 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria GG (N= 41).

Parametro	Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
Media	0.76	1018.45	21214.04	20195.59
Errore std.	0.05	51.37	1100.81	1113.38
I.C. 95%	0.65-0.86	914.6-1122.3	18989.2-23438.9	17945.4-22445.8
Mediana	0.78	1049.56	19994.05	18823.67
Minimo	0.28	353.98	11041.32	9917.36
Massimo	1.44	1733.33	43921.94	42930.21
Deviazione std.	0.34	328.96	7048.64	7129.14

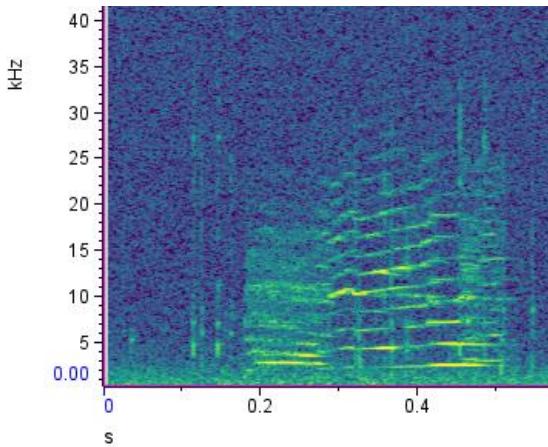


Figura A.14 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria GG.

Tabella A.16 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria H (N= 24).

Parametro	Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
Media	0.57	1047.72	18505.30	17457.59
Errore std.	0.08	111.59	1135.30	1186.60
I.C. 95%	0.41-0.73	816.9-1278.6	16156.7-20853.9	15002.9-19912.3
Mediana	0.36	998.86	17169.19	16118.78
Minimo	0.24	193.40	11865.21	9454.77
Massimo	1.25	3025.39	29480.63	28056.90
Deviazione std.	0.38	546.69	5561.84	5813.13

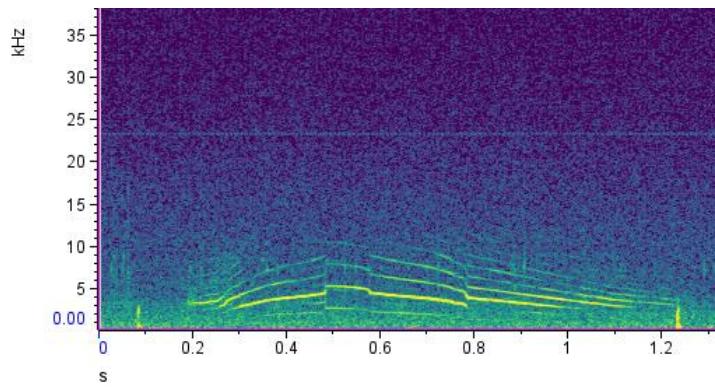


Figura A.15 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria H.

Tabella A.17 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria I ($N= 4$).

Parametro	Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
Media	0.83	1039.93	21080.27	20040.34
Errore std.	0.05	206.97	1433.08	1612.58
I.C. 95%	0.67-0.98	381.27-1698.6	16519.6-25640.9	14908.4-25172.3
Mediana	0.86	927.56	21304.89	20476.01
Minimo	0.68	674.16	17849.58	16219.15
Massimo	0.90	1630.44	23861.72	22990.21
Deviazione std.	0.10	413.93	2866.16	3225.17

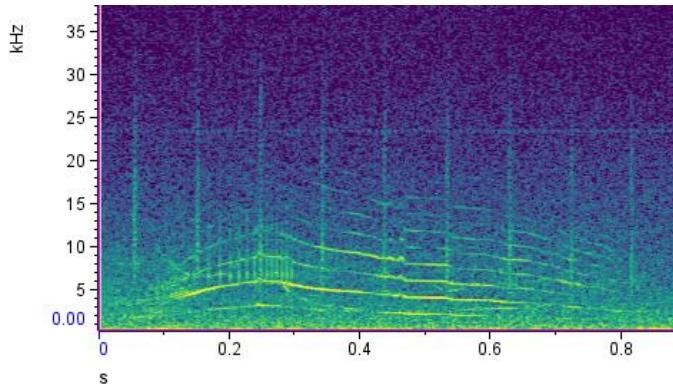


Figura A.16 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria I.

Tabella A.18 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria J ($N= 5$).

Parametro	Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
Media	1.06	1038.88	21158.07	20119.19
Errore std.	0.03	146.18	1437.72	1401.44
I.C. 95%	0.99-1.13	633.02-1444.7	17166.3-25149.8	16228.2-24010.2
Mediana	1.05	1094.88	21213.20	20719.87
Minimo	0.99	493.33	16532.93	15463.15
Massimo	1.13	1369.38	25529.20	24159.82
Deviazione std.	0.06	326.87	3214.84	3133.71

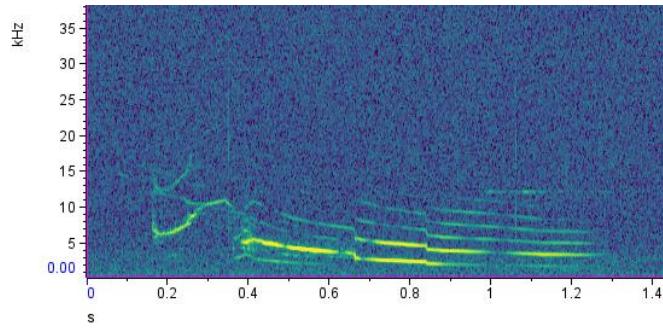


Figura A.17 - Spettrogramma di un suono pulsato (con HFC) appartenente alla macrocategoria J.

Tabella A.19 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria K (N= 5).

Parametro	Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
Media	0.65	1228.60	33226.37	31997.77
Errore std.	0.10	61.85	5454.64	5447.79
I.C. 95%	0.38-0.92	1056.9-1400.3	18081.8-48370.9	16872.3-47123.3
Mediana	0.50	1175.79	28725.94	27622.17
Minimo	0.48	1103.78	19777.13	18601.34
Massimo	0.91	1414.21	48091.78	46975.91
Deviazione std.	0.22	138.29	12196.96	12181.63

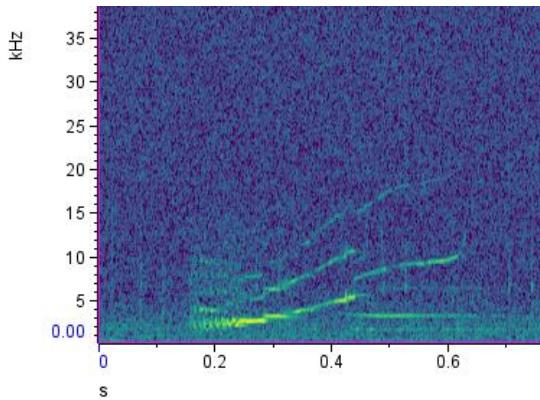


Figura A.18 - Spettrogramma di un suono pulsato (con HFC) appartenente alla macrocategoria K.

Tabella A.20 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria L (N= 7).

Parametro	Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
Media	1.27	909	19822.14	18913.14
Errore std.	0.11	156.06	2288.69	2187.99
I.C. 95%	1.00-1.54	527.13-1290.9	14221.9-25422.4	13559.3-24266.9
Mediana	1.35	895.81	18880.43	17570.81
Minimo	0.84	191.08	13840.03	13133.22
Massimo	1.67	1394.84	30491.07	29372.13
Deviazione std.	0.29	412.90	6055.31	5788.88

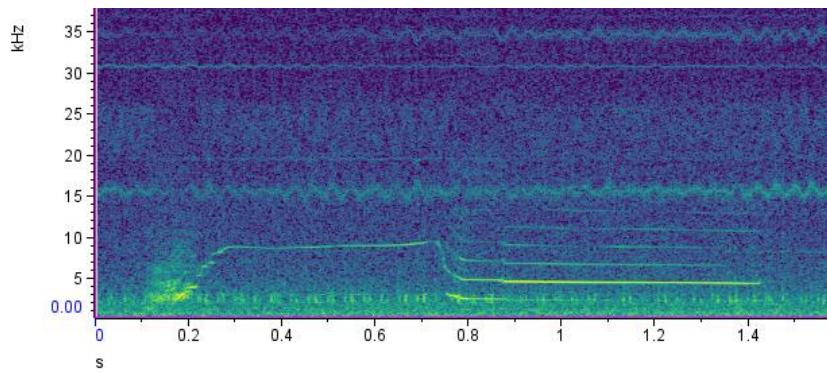


Figura A.19 - Spettrogramma di un suono pulsato (con HFC) appartenente alla macrocategoria L.

Tabella A.21 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria M (N= 2).

Parametro	Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
Media	1.02	1034.09	10696.95	9662.85
Errore std.	0.02	134.96	601.00	466.05
I.C. 95%	0.72-1.33	-680.7-2748.9	3060.5-18333.4	3741.2-15584.5
Mediana	1.02	1034.09	10696.95	9662.85
Minimo	1.00	899.14	10095.94	9196.81
Massimo	1.05	1169.05	11297.95	10128.90
Deviazione std.	0.03	190.86	849.95	659.09

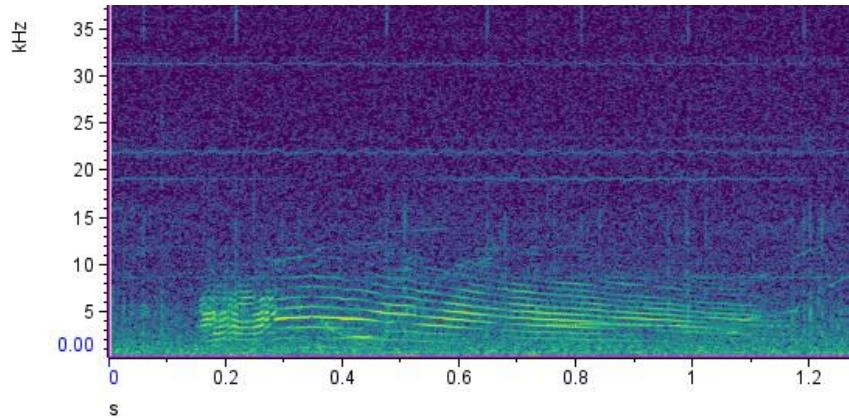


Figura A.20 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria M.

Tabella A.22 - Parametri acustici calcolati per il suono pulsato di buona qualità appartenente alla macrocategoria N (N= 1).

Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
0.60	1655.17	19600	17944.83

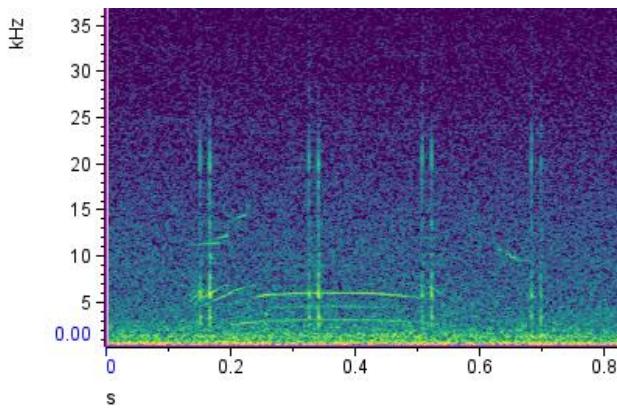


Figura A.21 - Spettrogramma di un suono pulsato (con HFC) appartenente alla macrocategoria N.

Tabella A.23 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria O ($N=2$).

Parametro	Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
Media	1.46	1313.71	16952.15	15638.45
Errore std.	0.10	155.81	335.14	179.33
I.C. 95%	0.14-2.78	-666.1-3293.5	12693.8-21210.5	13359.8-17917.1
Mediana	1.46	1313.71	16952.15	15638.45
Minimo	1.36	1157.90	16617.01	15459.12
Massimo	1.57	1469.52	17287.30	15817.78
Deviazione std.	0.15	220.35	473.96	253.61

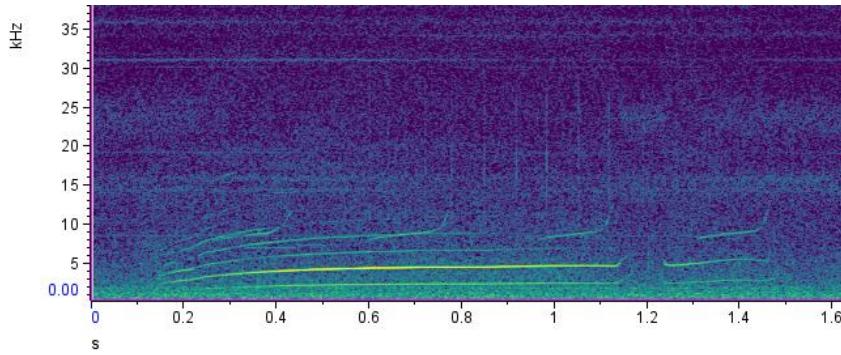


Figura A.22 - Spettrogramma di un suono pulsato (con HFC) appartenente alla macrocategoria O.

Tabella A.24 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria P ($N=31$).

Parametro	Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
Media	1.08	1080.30	25983.58	24903.28
Errore std.	0.04	130.95	1875.00	1783.05
I.C. 95%	1.00-1.16	812.85-1347.74	22154.3-29812.8	21261.8-28544.7
Mediana	1.09	758.46	23820.13	23097.24
Minimo	0.50	411.43	14912.44	13830.75
Massimo	1.46	3356.82	57440.57	54922.96
Deviazione std.	0.22	729.12	10439.58	9927.60

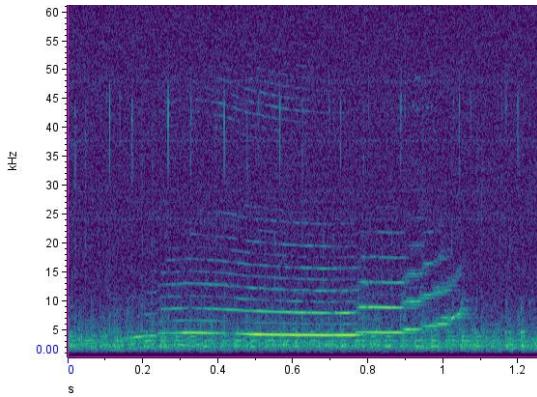


Figura A.23 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria P.

Tabella A.25 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria Q (N= 7).

Parametro	Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
Media	1.01	646.23	21209.11	20562.88
Errore std.	0.08	142.83	2752.03	2710.36
I.C. 95%	0.80-1.21	296.74-995.72	14475.1-27943.1	13930.9-27194.9
Mediana	1.05	413.80	17821.14	17430.89
Minimo	0.62	329.98	12902.51	12572.52
Massimo	1.32	1304.30	31370.50	30956.70
Deviazione std.	0.22	377.89	7281.17	7170.94

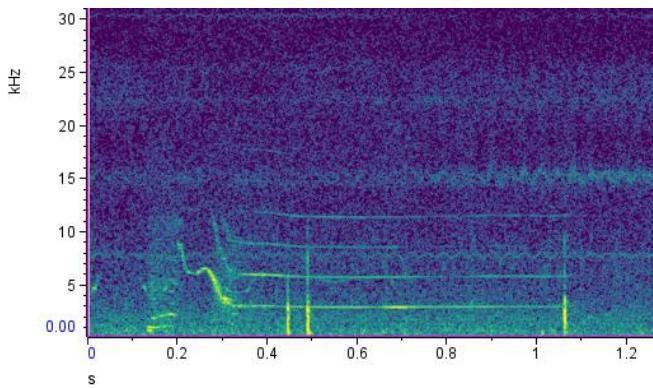


Figura A.24 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria Q.

Tabella A.26 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria R (N= 3).

Parametro	Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
Media	0.68	1496.74	14631.86	13135.12
Errore std.	0.13	518.26	1504.42	2012.63
I.C. 95%	0.14-1.23	-733.14-3726.63	8158.9-21104.8	4475.5-21794.8
Mediana	0.67	1031.36	15672.27	14744.92
Minimo	0.47	927.35	11666.67	9135.15
Massimo	0.91	2531.52	16556.65	15525.29
Deviazione std.	0.22	897.65	2605.73	3485.98

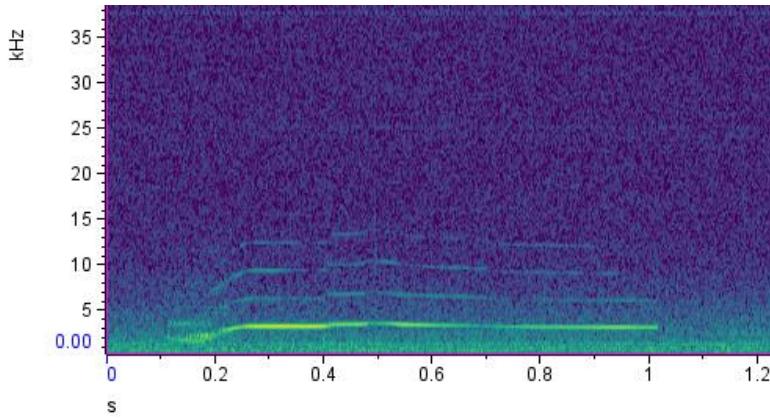


Figura A.25 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria R.

Tabella A.27 - Parametri acustici calcolati per il suono pulsato di buona qualità appartenente alla macrocategoria S (N= 1).

Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
1.35	1597.23	14874.2	13276.97

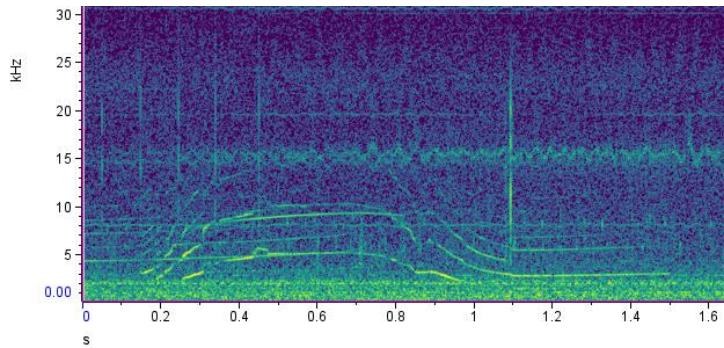


Figura A.26 - Spettrogramma di un suono pulsato (con HFC) appartenente alla macrocategoria S.

Tabella A.28 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria T (N= 4).

Parametro	Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
Media	1.02	463.95	20911.29	20447.34
Errore std.	0.01	13.08	719.53	719.28
I.C. 95%	0.99-1.04	422.32-505.59	18621.4-23201.2	18158.3-22736.4
Mediana	1.01	473.53	21200.80	20746.42
Minimo	1.00	426.63	18928.34	18463.40
Massimo	1.04	482.12	22315.24	21833.12
Deviazione std.	0.02	26.16	1439.06	1438.56

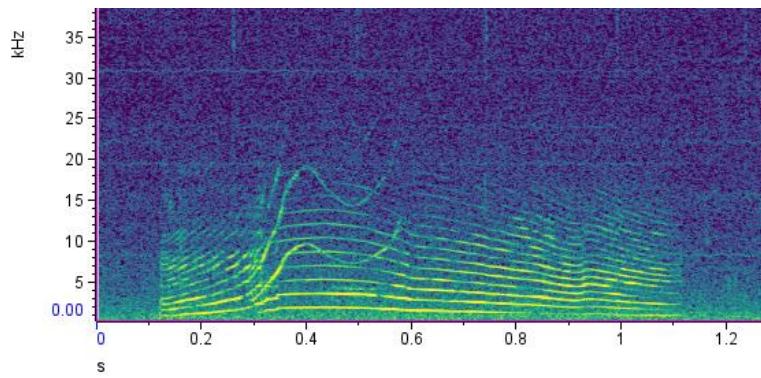


Figura A.27 - Spettrogramma di un suono pulsato (con HFC) appartenente alla macrocategoria T.

Tabella A.29 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria U ($N= 27$).

Parametro	Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
Media	0.40	1967.06	17001.02	15033.96
Errore std.	0.09	154.48	868.80	858.23
I.C. 95%	0.21-0.59	1649.5-2284.6	15215.2-18786.9	13269.8-16798.1
Mediana	0.15	1944.00	15483.96	13750.67
Minimo	0.05	988.24	11129.06	8510.46
Massimo	1.93	2985.56	28461.43	27294.15
Deviazione std.	0.48	802.70	4514.40	4459.50

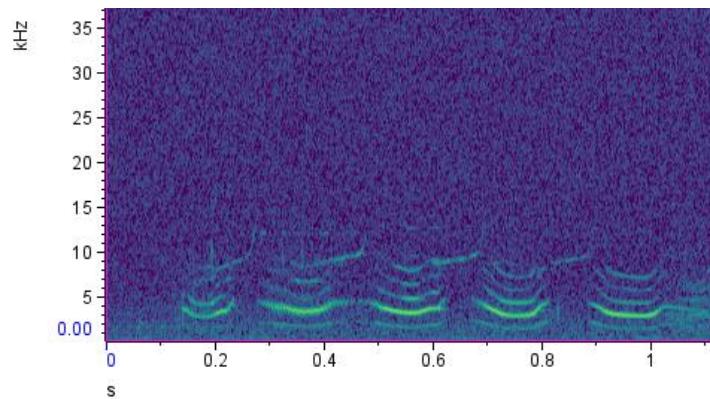


Figura A.28 - Spettrogramma di un suono pulsato (con HFC) appartenente alla macrocategoria U.

Tabella A.30 - Parametri acustici calcolati per il suono pulsato di buona qualità appartenente alla macrocategoria V ($N= 1$).

Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
1.93	588.56	39338.98	38750.43

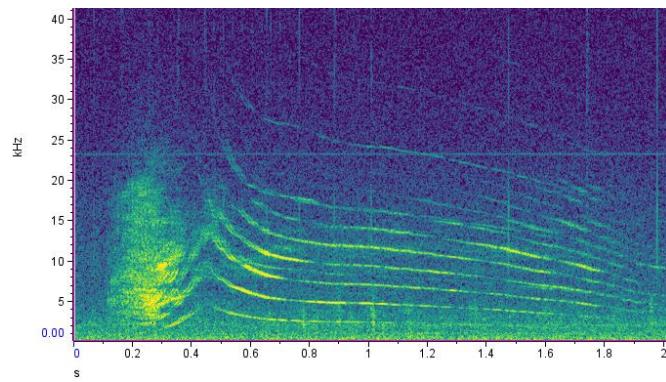


Figura A.29 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria V.

Tabella A.31 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria W ($N= 2$).

Parametro	Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
Media	0.48	841.11	23032.10	22190.99
Errore std.	0.05	247.38	293.13	45.75
I.C. 95%	-0.17-1.14	-2302.2-3984.4	19307.5-26756.7	21609.7-22772.2
Mediana	0.48	841.11	23032.10	22190.99
Minimo	0.43	593.72	22738.97	22145.25
Massimo	0.54	1088.49	23325.23	22236.74
Deviazione std.	0.07	349.85	414.55	64.69

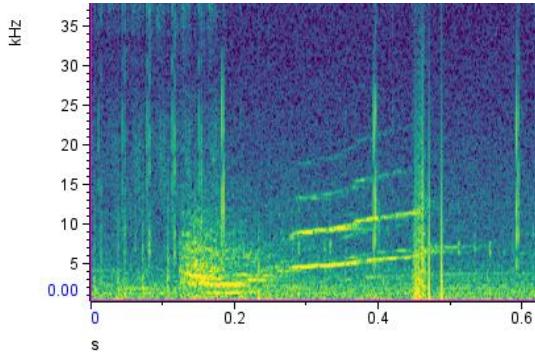


Figura A.30 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria W.

Tabella A.32 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria X ($N= 3$).

Parametro	Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
Media	0.50	912.25	26537.47	25625.22
Errore std.	0.08	335.65	6670.33	6335.60
I.C. 95%	0.17-0.82	-531.93-2356.43	-2162.7-55237.6	-1634.6-52885.1
Mediana	0.50	593.72	20364.68	19804.91
Minimo	0.37	559.77	19381.68	18787.96
Massimo	0.63	1583.26	39866.07	38282.81
Deviazione std.	0.13	581.36	11553.36	10973.57

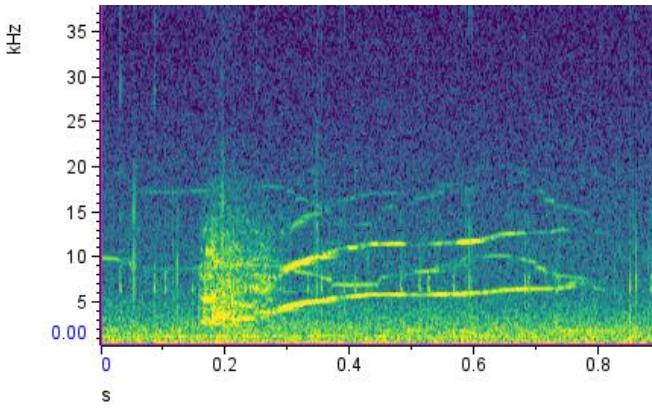


Figura A.31 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria X.

Tabella A.33 - Statistiche descrittive dei parametri acustici calcolati per i suoni pulsati di buona qualità appartenenti alla macrocategoria Y (N= 4).

Parametro	Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
Media	1.41	958.05	31128.93	30170.88
Errore std.	0.09	80.19	4746.06	4784.06
I.C. 95%	1.12-1.7	702.84-1213.3	16024.8-46233	14945.9-45395.9
Mediana	1.39	1032.83	34143.98	33101.06
Minimo	1.22	717.79	17828.57	16800.00
Massimo	1.65	1048.74	38399.18	37681.39
Deviazione std.	0.18	160.39	9492.13	9568.12

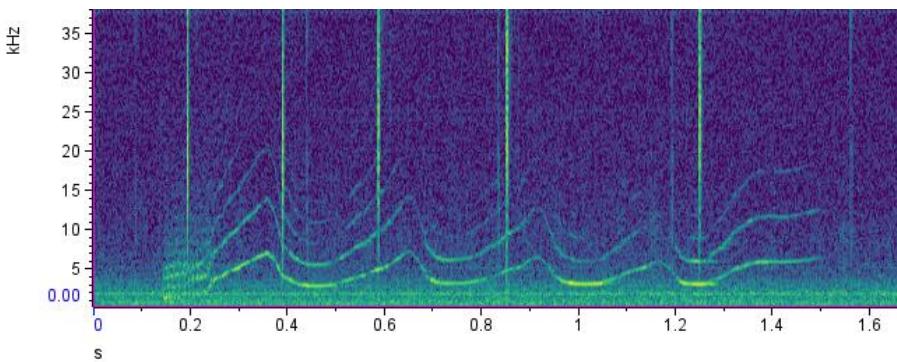


Figura A.32 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria Y.

Tabella A.34 - Parametri acustici calcolati per il suono pulsato di buona qualità appartenente alla macrocategoria Z (N= 1).

Durata (s)	Frequenza Minima (Hz)	Frequenza Massima (Hz)	Range di Frequenza (Hz)
1.09	2431.31	19742.26	17310.95

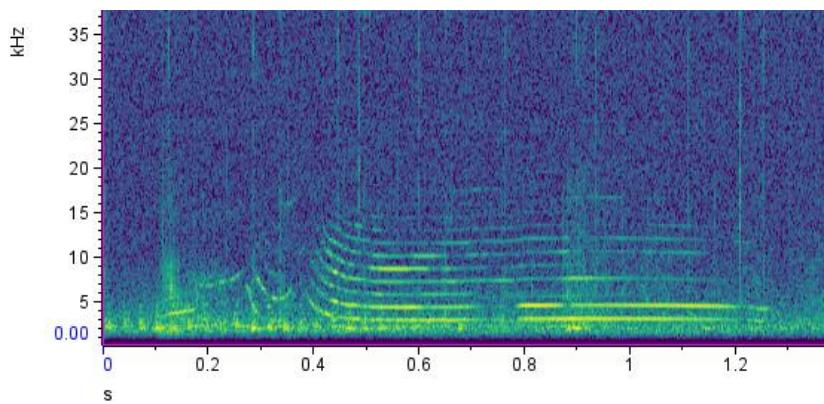


Figura A.33 - Spettrogramma di un suono pulsato appartenente alla macrocategoria Z.

Tabella A.35 - Tabella di frequenza delle 33 macrocategorie per tutte le 34 registrazioni.

ID Registrazione	A	AA	B	BB	C	CC	D	DD	E	EE	F	FF	G	GG	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
CSR_20110726_102103	6	0	64	0	3	0	5	0	13	0	1	0	14	0	63	11	8	5	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
CSR_20110816_184405	0	0	96	0	0	0	11	0	0	0	0	0	8	0	1	0	1	0	0	0	3	6	13	0	0	0	0	0	0	0			
CSR_20110816_202609	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
CSR_20110825_192919	16	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	9	0	0	0	29	18	26	1	6	30	0	0	0	0			
CSR_20110825_202732	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	0	0	2	9	8	0	0	0	0	0	0			
CSR_20130726_153113	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
CSR_20130726_155245	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	15	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
CSR_20130726_161731	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	3	0	0	0			
CSR_20150827_080953_352_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	5	0	0			
CSR_20150827_103047_283	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
CSR_20160803_093647_746	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0		
CSR_20160803_100751_929	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
CSR_20160803_103856_064	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
CSR_20160901_173308_679	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	5	0	0	0	0	0	0	2	0	0		
CSR_20160901_180216_689	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
CSR_20170817_091440_982	0	10	5	8	0	0	0	0	2	0	0	0	14	0	7	0	0	0	0	0	3	24	0	0	0	0	0	0	0	0	15		
CSR_20170817_094545_122	0	4	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	3	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
CSR_20170817_101649_258	0	0	30	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	7	6	0	0	2	1	0	0	0	2	0	11	0	0		
CSR_20170817_104753_392	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
CSR_20190918_060146_2CH96K16	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
CSR_20190918_063037_2CH96K16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
CSR_20190918_073843_2CH96K16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	59	0	0	87	0	0	0	0	0	0	2	49	0	0	0	5	0	0	0	0		

CSR_20200715_124256 _2CH96K16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CSR_20200916_114719	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	38	65	0	0	0	0	0	0	13	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CSR_20200916_125303	43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	38	13	0	4	0	0	0	0	1	66	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0
CSR_20200916_140659	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CSR_Gm_20200917 _123956	0	0	3	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CSR_Gm_20200917 _134641	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0
CSR_20220713_164758 _792	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CSR_20220713_172637 _872	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CSR_20220713_182846 _664	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CSR_20220824_113847 _432_Gm002	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	49	0	2	4	0	0	0
CSR_20220824_123916 _048_Gm002	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	7	0	0	0	0	6	0	1	2	0
CSR_20220824_134125 _003_Gm002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0

BIBLIOGRAFIA

- ACCOBAMS (2021). Estimates of abundance and distribution of cetaceans, marine mega-fauna and marine litter in the Mediterranean Sea from 2018-2019 surveys. (eds., Panigada, S., Boisseau, O., Canadas, A., Lambert, C., Laran, S., McLanaghan, R., Moscrop, A.) ACCOBAMS - ACCOBAMS Survey Initiative Project, Monaco, 177 pp.
- Allen, J. A., Garland, E. C., Dunlop, R. A., and Noad, M. J. (2018). Cultural revolutions reduce complexity in the songs of humpback whales. *P. R. Soc B-Biol. Sci.* 285, 20182088.
- Amos, B., Schlotterer, C., and Tauz, D. (1993). Social structure of pilot whales revealed by analytical DNA profiling. *Science* 260, 670–672.
- Aplan, J. D., Melillo-Sweeting, K. & Reiss, D. (2018). Biphonal calls in Atlantic spotted dolphins (*Stenella frontalis*): bitonal and burst-pulse whistles. *Bioacoustics* 27, 145–164.
- Arribart, M., Ognard, J., Guintard, C., Domergue, F., Hassani, S., Ben Salem, D., & Jung, J.-L. (2017). Magnetic resonance imaging study of adipose tissues in the head of a common dolphin (*Delphinus delphis*): Structure identification and influence of a freezing-thawing cycle. *Anatomia Histologica and Embryologia*, 46, 204–212.
- Au, W. W. L. (1993). *The sonar of dolphins* (New York, NY: Springer-Verlag).
- Au, W.W.L. (2000). Hearing by whales and dolphins: an overview. In: *Hearing by Whales and Dolphins*. Edited by: Au, W.W.L., Popper, A.N. and Fay, R.R., New York: Springer-Verlag.
- Azzellino, A., Panigada, S., Lanfredi, C., Zanardelli, M., Airolidi, S., & di Sciara, G. N. (2012). Predictive habitat models for managing marine areas: spatial and temporal distribution of marine mammals within the Pelagos Sanctuary (Northwestern Mediterranean Sea). *Ocean & coastal management*, 67, 63-74.
- Becker, Y. A., Fioramonti, N. E., Dellabianca, N. A., & Ricciardelli, L. (2021). Feeding ecology of the long-finned pilot whale, *Globicephala melas edwardii*, in the southwestern Atlantic Ocean, determined by stable isotopes analysis. *Polar Biology*, 44(8), 1655-1667.
- Bigg, M.A., Olesiuk, P.F., Ellis, G.M., Ford, J.K.B. & Balcomb, K.C. (1990). Social organization and genealogy of resident killer whales (*Orcinus orca*) in the coastal waters of British Columbia and Washington State. — *Rep. Int. Whal. Commn.* 12: 383-405.
- Bradbury, J.W. and Vehrencamp, S.L. (1998). *Principles of Animal Communication*. Massachusetts: Sinauer Associates Inc.
- Braulik GT, Taylor BL, Minton G, Notarbartolo di Sciara G, Collins T, Rojas-Bracho L, Crespo EA, Ponnapalem LS, Double MC, Reeves RR. (2023). Red-list status and extinction risk of the world's whales, dolphins, and porpoises. *Conserv Biol.* 2023 Oct;37(5): e14090.
- Burnham, R.; Duffus, D. (2023). Implication of Altered Acoustic Active Space for Cetacean Species That Result from Soundscape Changes and Noise Additions. *Acoustics*, 5, 444–461.
- Busnel, R.G., Escudie, B., Dziedzic, A., and Hellion, A. (1971). Structure des clics doubles d'écholocation du globicephale (Cetace odontocete). Comptes rendus de l'Académie des sciences. 272: 2459-2461.
- Caldwell, M. C. & Caldwell, D. D. (1971). Statistical evidence for individual signature whistles in Pacific whitesided dolphin *Lagenorhynchus obliquidens*. *Cetology* 3, 1–9.
- Connor R. C. (2000). Group living in whales and dolphins. Pp. 199–218 in *Cetacean societies: field studies of dolphins and whales* (Mann J. Connor R. C. Tyack P. L. Whitehead H., eds.). University of Chicago Press, Chicago, Illinois.
- Connor, R.C., Mann, J., Tyack, P.L., and Whitehead, H. (1998). Social evolution in toothed whales. *Trends in Ecology and Evolution*, 13 (6): 228-232.
- Connor, R.C., Wells, R.S., Mann, J. & Read, A.J. (2000). The bottlenose dolphin: social relationships in a fission–fusion society. — In: *Cetacean societies: field studies of dolphins and whales* (Mann, J., Connor, R.C., Tyack, P.L. & Whitehead, H., eds). *University of Chicago Press, Chicago, IL*, p. 91-126.

- Courts, R., Erbe C., Wellard, R., Boisseau, O., Jenner, K.C., Jenner, M.N. (2020) Australian long-finned pilot whales (*Globicephala melas*) emit stereotypical, variable, biphonic, multi-component, and sequenced vocalisations, similar to those recorded in the northern hemisphere. *Scientific Report* 10, 20609.
- Cranford, T. W., and Amundin, M. (2004). "Biosonar pulse production in odontocetes: The state of our knowledge," in *Echolocation in Bats and Dolphins*, edited by J. A. Thomas, C. F. Moss, and M. Vater (The University of Chicago, Chicago), pp. 27–35.
- Cranford, T.W., Amundin, M., and Norris, K.S. (1996). Functional morphology and homology in the Odontocete nasal complex: implications for sound generation. *Journal of Morphology*, 228:223-285.
- Cranford, T. W., Elsberry, W. R., Van Bonn, W. G., Jeffress, J. A., Chaplin, M. S., Blackwood, D. J., ... & Ridgway, S. H. (2011). Observation and analysis of sonar signal generation in the bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*): evidence for two sonar sources. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 407(1), 81-96.
- Cusano, D. A., Paton, D., Noad, M. J., and Dunlop, R. A. (2022). Socially complex breeding interactions in humpback whales are mediated using a complex acoustic repertoire. *Front. Mar. Sci.* 8.
- Dawson, S. M. (1991). Clicks and communication: the behavioural and social contexts of hector's dolphin vocalizations. *Ethology* 88, 265–276.
- Deecke, V. B., Ford, J. K., and Spong, P. (2000). Dialect change in resident killer whales: Implications for vocal learning and cultural transmission. *Anim. Behav.* 60, 629-638.
- De Stephanis, R., García-Tíscar, S., Verborgh, P., Esteban-Pavo, R., Pérez, S., Minvielle-Sebastia, L., & Guinet, C. (2008b). Diet of the social groups of long-finned pilot whales (*Globicephala melas*) in the Strait of Gibraltar. *Marine Biology*, 154(4), 603-612.
- De Stephanis, R., Verborgh, P., Pérez, S., Esteban, R., Minvielle-Sebastia, L. and Guinet, C. (2008a). Longterm social structure of long-finned pilot whales (*Globicephala melas*) in the Strait of Gibraltar. *Acta Ethologica* 11(2): 81–94.
- Donovan, G. P., Lockyer, C. H., and Martin, A. R. (eds.) (1993). Biology of Northern Hemisphere pilot whales. *Rep. Int. Whal. Comm.* 14 (Special Issue).
- Dudzinski KM, Thomas JA, Gregg JD (2009). Communication in marine mammals. In: Perrin W, Würsig B, Thewissen J (eds) Encyclo-pedia of Marine Mammals. Elsevier, Amsterdam, pp 260–269.
- Erbe, C. *et al.* (2017). Review of underwater and in-air sounds emitted by Australian and Antarctic marine mammals. *Acoust. Aust.* 45, 179–241.
- Filatova, O. A. *et al.* (2012). Call diversity in the North Pacific killer whale populations: implications for dialect evolution and population history. *Anim. Behav.* 83, 595–603.
- Filatova OA, Fedutin ID, Nagaylik MM, Burdin AM, Hoyt E. (2009). Usage of monophonic and biphonic calls by free-ranging resident killer whales (*Orcinus orca*) in Kamchatka, Russian Far East. *Acta Ethol.* 12:37–44.
- Filatova, O. A., Samarra FIP, Barrett-Lennard L.G., Miller P.J.O, Ford J.K.B, Yurk H., *et al.* (2016). Physical constraints of cultural evolution of dialects in killer whales. *J Acoust Soc Amer*, 140(5): 3755–3764.
- Ford, J.K.B. (1989). Acoustic behaviour of resident killer whales (*Orcinus orca*) off Vancouver Island, British Columbia. *Canadian Journal of Zoology*, 67: 727-745.
- Ford, J. K. B. & Fisher, H. D. (1978). Underwater acoustic signals of the narwhal (*Monodon monoceros*). *Can. J. Zool.*, 56, 552-560.
- Ford, J. K. B. & Fisher, H. D. (1983). Group-specific dialects of killer whales (*Orcinus orca*) in British Columbia. In: *Communication and Behavior of Whales*. (Ed. By R. Payne), pp. 129-161. Boulder, Colorado: Westview Press.
- Gauffier P. & Verborgh P. (2021). *Globicephala melas (Inner Mediterranean subpopulation)*. The IUCN Red List of Threatened Species 2021: e.T198785664A198787672.

- Giorli, G., Au, W.W.L. and Neuheimer, A. (2016). Differences in foraging activity of deep-sea diving odontocetes in the Ligurian Sea as determined by passive acoustic recorders. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 107: 1–8.
- Hebets, E.A. and Papaj, D.R. (2005). Complex signal function: developing a framework of testable hypotheses. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 57: 197–214.
- Herzing, D. L. (1996). Vocalizations and associated underwater behavior of free-ranging Atlantic spotted dolphins, *Stenella frontalis* and bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus*. *Aquat. Mamm.* 22, 61–79.
- Herzing, D. L. (2004). “Social and non-social uses of echolocation in freeranging stenella frontalis and tursiops truncatus,” in *Advances in the study of echolocation in bats and dolphins* (Springer-Verlag Press), 404–410.
- Herzing, D. L. (2014). Clicks, whistles and pulses: passive and active signal use in dolphin communication. *Acta Astronaut.* 105, 534–537.
- Herzing, D. L., and dos Santos, M. E. (2004). “Functional aspects of echolocation in dolphins,” in *Advances in the study of echolocation in bats and dolphins* (Springer-Verlag Press), 386–393.
- Janik VM, Slater PJB (1998). Context-specific use suggests that bottlenose dolphin signature whistles are cohesion calls. *Anim Behav* 56:829–838.
- Jiang, Y., Liu, Z. W., Yang, C. M., Lü, L. G., and Muda, A. M. (2020). Highfrequency whistles of irrawaddy dolphins (*Orcaella brevirostris*) recorded in Brunei bay. *Mar. Mammal Sci.* 36 (3), 846–857.
- Jones, B., Zapetis, M., Samuelson, M. M., & Ridgway, S. (2020). Sounds produced by bottlenose dolphins (*Tursiops*): A review of the defining characteristics and acoustic criteria of the dolphin vocal repertoire. *Bioacoustics*, 29(4), 399-440.
- Jones, G. (2005). Echolocation. *Curr Biology* 15(13): 484–488.
- Kaplan, J. D., Melillo-Sweeting, K., and Reiss, D. (2018). Biphonal calls in Atlantic spotted dolphins (*Stenella frontalis*): bitonal and burst-pulse whistles. *Bioacoustics* 27, 145–164.
- Karlsen, J. D., Bisther, A., Lydersen, C., Haug, T. & Kovacs, K. M. (2002). Summer vocalizations of adult male white whales (*Delphinapterus leucas*) in Svalbard, Norway. *Polar Biol.*, 25, 808-817.
- Ketten, D. R. (1992). The marine mammal ear: specializations for aquatic audition and echolocation. In *The evolutionary biology of hearing* (pp. 717-750). Springer, New York, NY.
- Ketten, D.R. (1997). Structure and function in whale ears. *Bioacoustics*, 8, 103–136.
- Ketten, D.R. (2000). Cetacean ears. In: *Hearing by Whales and Dolphins*. Edited by: Au, W.W.L., Popper, A.N. and Fay, R.R., Springer-Verlag: New York, 43-108.
- King, S.L., Connor, R.C., Krützen, M. et al. (2021). Cooperation-based concept formation in male bottlenose dolphins. *Nat Commun* 12, 2373.
- Koopman, H. N., Iverson, S. J., & Read, A. J. (2003). High concentrations of isovaleric acid in the fats of odontocetes: variation and patterns of accumulation in blubber vs. stability in the melon. *Journal of Comparative Physiology B*, 173(3), 247-261.
- Kriesell, H. J., Elwen, S. H., Nastasi, A., & Gridley, T. (2014). Identification and characteristics of signature whistles in wild bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) from Namibia. *PLoS one*, 9(9), e106317.
- Lammers, M. O., Au, W. W. L., Aubauer, R., and Nachtigall, P. E. (2004). *Echolocation bats dolphins* (Chicago: University Chicago Press).
- Lanfredi, C., De Santis, V., Jahoda, M. and Aioldi, S. Tethys Research Institute – Cetacean Sanctuary Research, (2021). Report on the 1990-2020 Research and Conservation Activities in the Pelagos Sanctuary (North western Mediterranean Sea). Tethys Research Institute. 2021 pp.56+ annex
- Madsen, P. T., and Wahlberg, M. (2007). Recording and quantification of ultrasonic echolocation clicks from free-ranging toothed whales. *Deep. Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.* 54, 1421–1444.

- Madsen, P. T., Lammers, M., Wisniewska, D., and Beedholm, K. (2013). "Nasal sound production in echolocating delphinids (*Tursiops truncatus* and *Pseudorca crassidens*) is dynamic, but unilateral: Clicking on the right side and whistling on the left side," *J. Exp. Biol.* 216(21), 4091–4102.
- Madsen, P.T., Siebert, U., Elemans, C.P.H. (2023). Toothed whales use distinct vocal registers for echolocation and communication. *Science* 379, 928–933.
- Martin, M. J., Elwen, S. H., Kassanjee, R., and Gridley, T. (2019). To buzz or burst-pulse? the functional role of heaviside's dolphin, *Cephalorhynchus heavisidii*, rapidly pulsed signals. *Anim. Behav.* 150, 273–284.
- Martin, M. J., Gridley, T., Elwen, S. H., and Jensen, F. H. (2018). Heavisides dolphins (*Cephalorhynchus heavisidii*) relax acoustic crypsis to increase communication range. *Proc. R. Soc B Biol. Sci.* 285, 20181178.
- Miller, P.J.O. (2006). Diversity in sound pressure levels and estimated active space of resident killer whale vocalizations. *Journal of Comparative Physiology A*, 192: 449-459.
- Minton, G., Reeves R. & Braulik G. (2018). *Globicephala melas*. The IUCN Red List of Threatened Species 2018: e.T9250A50356171.
- Mishima, Y. et al. (2015). Individuality embedded in the isolation calls of captive beluga whales (*Delphinapterus leucas*). *Zool. Lett.* 1, 27. <https://doi.org/10.1186/s40851-015-0028-x>.
- Murray, S. O., Mercado, E. & Roitblat, H. L. (1998). Characterizing the graded structure of false killer whale (*Pseudorca crassidens*) vocalizations. *J. Acoust. Soc. Am.* 104, 1679–1688.
- Nemiroff L. (2009). Structural variation and communicative functions of long-finned pilot whale (*Globicephala melas*) pulsed calls and complex whistles [dissertation]. Halifax: Dalhousie University.
- Nemiroff, L., & Whitehead, H. (2009). Structural characteristics of pulsed calls of long-finned pilot whales *Globicephala melas*. *Bioacoustics*, 19(1-2), 6792.
- Norris, K. S. (1968). "The evolution of acoustic mechanisms in odontocete cetaceans," in *Evolution and Environment*, edited by E. T. Drake (Yale University, New Haven, CT), pp. 298–323.
- Notarbartolo-di-Sciara, G., Agardy, T., Hyrenbach, D., Scovazzi, T., & Van Klaveren, P. (2008). The Pelagos sanctuary for Mediterranean marine mammals. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 18(4), 367-391.
- Olson, P. A. and Reilly, S. B. (2002). Pilot whales *Globicephala melas* and *G. macrorhynchus*. In: W. F. Perrin, B. Wursig and J. G. M. Thewissen (eds), *Encyclopedia of Marine Mammals*, pp. 898-903. Academic Press.
- Olson, P.A. (2009). Pilot Whales, *Globicephala melas* and *G. macrorhynchus*. In: W. F. Perrin, B. Würsig, J.G.M. Thewissen (eds), *Encyclopedia of Marine Mammals Second Edition*, pp. 847-852. Academic Press.
- Olson, P.A. (2018). Pilot Whales, *Globicephala melas* and *G. macrorhynchus*. In: Wursig, B., Thewissen, J.G. M. and Kovacs, K. M. (eds), *Encyclopedia of Marine Mammals Third Edition*, pp. 701-705. Elsevier, San Diego, California, USA.
- Pace, D. S., Lanfredi, C., Aioldi, S., Giacomini, G., Silvestri, M., Pavan, G., & Ardizzone, D. (2021). Trumpet sounds emitted by male sperm whales in the Mediterranean Sea. *Scientific reports*, 11(1), 1-16.
- Papale, E., Gamba, M., Perez-Gil, M., Martin, V. M., and Giacoma, C. (2015). Dolphins adjust species-specific frequency parameters to compensate for increasing background noise. *PLoS One* 10: e0121711.
- Papale E., Fanizza C., Buscaino G., Ceraulo M., Cipriano G., Crugliano R., Grammauta R., Gregorietti M., Renò V., Ricci P., Santacesaria F.C., Maglietta R. and Carlucci R. (2020). The Social Role of Vocal Complexity in Striped Dolphins. *Front. Mar. Sci.* 7:584301.
- Pinzone, M., Damseaux, F., Michel, L.N. and Das, K. (2019). Stable isotope ratios of carbon, nitrogen and sulphur and mercury concentrations as descriptors of trophic ecology and contamination sources of Mediterranean whales. *Chemosphere* 237: 124448.
- Prahl, S., Huggenberger S., Schliemann H. (2009) Histological and ultrastructural aspects of the nasal complex in the harbour porpoise, *Phocoena phocoena*. *J. Morphol.* 270, 1320–1337.
- Quick, N., Callahan, H. & Read, A. J. (2018). Two-component calls in short-finned pilot whales (*Globicephala macrorhynchus*). *Mar. Mamm. Sci.* 34, 155–168.

- Reidenberg, J. S., & Laitman, J. T. (2018). Anatomy of underwater sound production with a focus on ultrasonic vocalization in toothed whales including dolphins and porpoises. In *Handbook of behavioral neuroscience* (Vol. 25, pp. 509-519). Elsevier.
- Rendell, L.E., Matthews, J.N., Gill, A., Gordon, J.C.D., and Macdonald, D.W. (1999). Quantitative analysis of tonal calls from five odontocete species, examining interspecific and intraspecific variation. *Journal of Zoology, London*, 249: 403-410.
- Rogan, E., Cañadas, A., Macleod, K., Santos, M. B., Mikkelsen, B., Uriarte, A., ... & Hammond, P. S. (2017). Distribution, abundance and habitat use of deep diving cetaceans in the North-East Atlantic. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 141, 8-19.
- Sarnocińska, J., Teilmann, J., Balle, J. D., Beest, F. M. V., and Tougaard, J. (2020). Harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) reaction to a 3d seismic airgun survey in the North Sea. *Front. Mar. Sci.* 6, 824.
- Sayigh, L. S. (2013). Cetacean acoustic communication. In G. Witzany (Ed.), *Biocommunication of animals* (pp. 275–297). Dordrecht, TheNetherlands: Springer.
- Sayigh, L. S., Esch, H. C., Wells, R. S. & Janik, V. M. (2007). Facts about signature whistles of bottlenose dolphins *Tursiops truncatus*. *Anim. Behav.* 74, 1631–1642.
- Sayigh L. S., Tyack PL, Wells RS, Sollow AR, Scott MD, Irvine AB (1999). Individual recognition in wild bottlenose dolphins: a field test using playback experiments. *Anim Behav* 57:41–50.
- Schevill, W.E. and Watkins, W.A. (1966). Sound structure and directionality in *Orcinus* (killer whale). *Zoologica*, 51: 70-76.
- Senigaglia, V., de Stephanis, R., Verborgh, P. and Lusseau, D. (2012). The role of synchronized swimming as affiliative and anti-predatory behavior in long-finned pilot whale. *Behavioural Processes* 91(1): 8–14.
- Smith, H. J., Newman, J. D., and Symmes, D. (1982). Vocal concomitants of affiliative behavior in squirrel monkeys. In *Primate communication*. Edited by C. T. Snowdon, C. H. Brown, and M. R. Peterson. Cambridge University Press, Cambridge. pp. 30-49.
- Sørensen, P. M., Wisniewska, D. M., Jensen, F. H., Johnson, M., Teilmann, J., and Madsen, P. T. (2018). Click communication in wild harbour porpoises (*Phocoena phocoena*). *Sci. Rep.* 8, 1–11.
- Spitz J., Cherel Y., Bertin S., Kiszka J., Dewez A., Ridoux V. (2011) Prey preferences among the community of deep-diving odontocetes from the Bay of Biscay, Northeast Atlantic. *Deep-Sea Research I* 58 (2011) 273–282.
- Steiner, W. W. (1981). Species-specific differences in pure tonal whistle vocalizations of five western North Atlantic dolphin species. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 9, 241–246.
- Taruski, A. G. (1979). The whistle repertoire of the North Atlantic pilot whale (*Globicephala melaena*) and its relationship to behavior and environment. In *Behavior of marine animals* (pp. 345–368). Springer, Boston, MA.
- Thomas, J.A., Moss, C. F., and Vater, M. (2004). *Echolocation in Bats and Dolphins*. University of Chicago Press: Chicago.
- Trillmich, F., & Cantor, M. (2018). Sociobiology. In B. Würsig, J. G. M. Thewissen, & K. M. Kovacs (Eds.), *Encyclopedia of Marine Mammals (Third Edition)* (pp. 882-887). Academic Press.
- Tyack, P.L. (1986). Population biology, social behavior, and communication in whales and dolphins. *Trends in Ecology and Evolution*, 1:144-150.
- Tyack, P. L. (1997). Development and social functions of signature whistles in bottlenose dolphins *Tursiops truncatus*. *Bioacoustics* 8, 21–46.
- Tyack, P.L. (2000). Functional aspects of cetacean communication. In: *Cetacean Societies*. Edited by: Mann, J., Connor, R.C., Tyack, P.L., and Whitehead, H., University of Chicago Press: Chicago, 270-307.
- Verborgh, P. & Gauffier, P. (2021). *Globicephala melas (Strait of Gibraltar subpopulation)*. The IUCN Red List of Threatened Species 2021: e.T198787290A198788152.
- Verborgh, P., Gauffier, P., Esteban, R., Giménez, J., Cañadas, A., Salazar-Sierra, J. M. and de Stephanis, R. (2016). Conservation Status of Long-Finned Pilot Whales, *Globicephala melas*, in the Mediterranean Sea. In:

- Notarbartolo Di Sciara, G., Podestà, M. and Curry, B. E. (eds), *Mediterranean Marine Mammal Ecology and Conservation. Advances in Marine Biology*, vol. 75, pp. 173-203. Academic Press, Amsterdam.
- Vester, H. I. (2017). Vocal repertoires of two matrilineal social whale species Long-finned Pilot whales (*Globicephala melas*) & Killer whales (*Orcinus orca*) in northern Norway [Doctoral dissertation]. Georg-August-University Göttingen.
- Vester, H., Hallerberg, S., Timme, M., & Hammerschmidt, K. (2017). Vocal repertoire of long-finned pilot whales (*Globicephala melas*) in northern Norway. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 141(6), 4289-4299.
- Volodina, E. V., Volodin, I. A., Isaeva, I. V., and Unck, C. (2006). Biphonation may function to enhance individual recognition in the dhole, *Cuon alpinus*. *Ethology* 112, 815–825.
- Wang X-y, Jiang Y, Liu Z-w, Yang C-m, Chen B-y and Lü L-g (2022). Three types of pulsed signal trains emitted by Indo-Pacific humpback dolphins (*Sousa chinensis*) in Beibu Gulf, South China Sea. *Front. Mar. Sci.* 9:915668.
- Watkins, W.A. (1968). The harmonic interval: fact or artifact in spectral analysis of pulse trains. *Technical Report*. Woods Hole Oceanographic Institution USA.
- Watkins, W. A., and Schevill, W. E. (1977). Sperm whale codas. *J. Acoust. Soc. Am.* 62, 1485 – 1490.
- Weilgart, L. S., & Whitehead, H. (1990). Vocalizations of the North Atlantic pilot whale (*Globicephala melas*) as related to behavioral contexts. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 26(6), 399-402.
- Weilgart, L. & Whitehead, H. (1993). Coda communication by sperm whales (*Physeter macrocephalus*) of the Galápagos Islands. *Can. J. Zool.* 71, 744–752.
- Wellard, R., Pitman, R. L., Durban, J. & Erbe, C. (2020). Cold call: the acoustic repertoire of Ross Sea killer whales (*Orcinus orca*, Type C) in McMurdo Sound, Antarctica. *R. Soc. Open Sci.* 7, 191228.
- Werth, A. (2000). A kinematic study of suction feeding and associated behavior in the long-finned pilot whale, *Globicephala melas* (Traill). *Marine Mammal Science*, 16(2), 299-314.
- Whitehead, H. (2003). Sperm whales: social evolution in the ocean. University of Chicago Press, Chicago.
- Yoshida, Y. M., Morisaka, T., Sakai, M., Iwasaki, M., Wakabayashi, I., and Seko, A. (2014). Sound variation and function in captive commerson's dolphins (*Cephalorhynchus commersonii*). *Behav. Processes.* 108, 11–19.
- Yurk, H. (2005). Vocal culture and social stability in resident killer whales (*Orcinus orca*). Ph.D. thesis, Zoology, University of British Columbia.
- Zwamborn, E. M. J. & Whitehead, H. (2017). Repeated call sequences and behavioural context in long-finned pilot whales off Cape Breton, Nova Scotia, Canada. *Bioacoustics* 26, 169–183.

SITOGRAFIA

- https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/
- International Whaling Commission: <https://wwhandbook.iwc.int/en/species/pilot-whale>
- The Society for Marine Mammalogy: <https://marinemammalscience.org/facts/globicephala-melas/>
<https://marinemammalscience.org/science-and-publications/list-marine-mammal-species-subspecies/>.
- www.r-project.org
- www.ibm.com/it-it/products/spss-statistics

RINGRAZIAMENTI

Alla fine di questo percorso tanto impegnativo quanto formativo e gratificante, vorrei fare una serie di ringraziamenti a tutte le persone che hanno reso possibile la stesura di questo lavoro e anche a chi, con la propria vicinanza, mi ha tenuto la mano in questo piccolo viaggio.

Vorrei ringraziare la mia relatrice Daniela Silvia Pace per avermi dato l'opportunità di lavorare a questo progetto, per i suoi appassionanti insegnamenti e per i fondamentali consigli datimi durante la stesura di questo lavoro. Ringrazio l'Istituto Tethys per la fiducia dimostrata fornendomi dei dati tanto preziosi senza i quali non avrei potuto raggiungere questo piccolo grande traguardo. Un ringraziamento speciale va alla mia relatrice esterna Caterina Lanfredi, per avermi trasmesso con grande entusiasmo le sue conoscenze e aver reso leggeri e divertenti anche i momenti più ostici di questo percorso. Inoltre, vorrei ringraziare Giulia, per la sua disponibilità e per avermi sempre spronata ad affrontare con tenacia anche quelli che per me sembravano essere dei limiti insormontabili.

Ringrazio la mia famiglia, i miei amici e tutte le persone che mi sono state vicine in questo percorso anche solo con un “Come stai? Che dicono i globicefali?”. In particolare:

Vorrei ringraziare i miei genitori Enza e Patrizio per avermi sempre sostenuta, incoraggiata e soprattutto sopportata con infinita pazienza (mamma, adesso puoi tornare ad ascoltare la musica ad alto volume). Ringrazio mia sorella Giulia per esserci sempre e per aiutarmi a reagire in ogni situazione con determinazione. Un grazie va anche ad Alessandro, per il suo supporto e aiuto.

A Claudia. Ti dico grazie Cuoricino per essere una costante nella mia vita da dieci anni a questa parte. Grazie per essere sempre la stessa persona con la quale ridere fino alle lacrime e pianificare la prossima “travolgente avventura”. Grazie perché ho la certezza che in qualsiasi posto ci troveremo, anche a chilometri e chilometri di distanza, ci raggiungeremo sempre.

A Fabio. Ti ringrazio perché, come dico sempre alle mie amiche, per me sei stato un grande regalo. Grazie perché sei riuscito a rendere questo percorso ancora più speciale ed emozionante, grazie per aver gioito con me e per avermi tirato su quando ne avevo bisogno; ci sei sempre riuscito.

A Franceschina. Ti ringrazio per essere sempre la mia confidente e l'amica che riesce a capirmi in ogni situazione. Grazie per essere stata al mio fianco anche questa volta.

Alle amiche di sempre, Erica, Michela, Polipo, Martina, Valeria, Poppy e Benedetta. Vi ringrazio perché dopo tanti anni siamo ancora qui a condividere i nostri piccoli traguardi insieme. Grazie per continuare a crescere insieme, e come direbbero Erica e Michela, grazie per la pazienza (lo scrivo solo per farle contente).

Ad Antonio. Grazie perché con il tuo modo unico e speciale riesci sempre a risollevarmi e a strapparmi una risata anche nei momenti meno rosei. Sei il miglior amico che una persona possa desiderare.

A Niccolò, Oliver e Carlo. Vi ringrazio per tutti i momenti divertenti e spensierati vissuti insieme.

A tutti i miei cugini, i miei zii e mia nonna. Grazie per il sostegno morale che mi avete sempre dato, per tutti i consigli e soprattutto per avermi sopportato ad ogni "non posso, devo studiare!". Grazie per essere sempre riusciti a farmi staccare un po' la spina anche con una semplice cena.

Infine, un pensiero e un ringraziamento speciali vanno anche ai miei angioletti, nonna Lida, nonno Renato ed Ermione. Li ringrazio perché, seppur in modo diverso, mi hanno insegnato tanto e il loro amore è stato un faro che mi ha guidata nel prendere le decisioni che mi hanno portata fin qui.

Grazie a tutti.