

Πανεπιστήμιο Αιγαίου
Τμήμα Περιβάλλοντος
ΠΜΣ Περιβαλλοντική Πολιτική & Διατήρηση της Βιοποικιλότητας



Διπλωματική εργασία

Φοιτητής: Οικονομίδης Κυριάκος / envm16008@gmail.gr

Επιβλέπων Καθηγητής: Ματσίνος Ιωάννης

Τίτλος εργασίας: Αξιολόγηση Ακουστικών Δεικτών Βιοποικιλότητας

Acoustic indicators for biodiversity assessment

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη

1. Εισαγωγή

2. Ακουστικοί δείκτες βιοποικιλότητας

2.1. Δείκτες βιοποικιλότητας

2.2. Δείκτες εντός ομάδας: α ακουστική πολυμορφία

2.3. Δείκτες έντασης

2.4. Δείκτες πολυπλοκότητας

2.5. Δείκτες Ηχοτοπίου

2.6. Δείκτες μεταξύ ομάδων : β ακουστική πολυμορφία

3. Κριτήρια επιλογής ακουστικών δεικτών

3.1. Συσχέτιση των δεικτών με το θόρυβο του περιβάλλοντος (υποβάθρου)

3.2. Το εύρος σήματος του ακουστικού δείκτη

3.3. Συσχέτιση των δεικτών με τον πλούτο των ειδών

3.4. Η αλληλεπίδραση των δεικτών

3.5. Συσχέτιση των δεικτών με τη ακουστική δραστηριότητα

3.6. Συσχέτιση των δεικτών με την ακουστική ετερογένεια

3.7. Συσχέτιση των δεικτών με τη ταυτότητα των ειδών

3.8. Συσχέτιση των δεικτών με το τοπίο

3.9. Συσχέτιση των δεικτών με τη χρονική κατανομή της ακουστικής δραστηριότητας

3.10. Συσχέτιση των δεικτών με τη φασματική κατανομή της ακουστικής δραστηριότητας

3.11. Συσχέτιση των δεικτών με τις κλιματολογικές συνθήκες

3.12. Συσχέτιση των δεικτών με την απόσταση από τα μικρόφωνα εγγραφής

3.13. Ο ανοιχτός κώδικας (open source)

4. Εντροπία

5. Μέθοδοι μείωσης θορύβου υποβάθρου

Συμπεράσματα

Βιβλιογραφικές αναφορές

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στις μέρες μας οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες επηρεάζουν τη βιοποικιλότητα σε μεγαλύτερο βαθμό από ποτέ. Κατά συνέπεια, εργαλεία που μπορούν να παρακολουθούν αποτελεσματικά τις αλλαγές στις κοινότητες καθίστανται ολοένα και πιο σημαντικά. Μέχρι σήμερα, η επιστήμη της ακουστικής οικολογίας εστίαζε στην ατομική συμπεριφορά σε σχέση με τον πληθυσμό και τα είδη εξελικτικών επιπέδων, αλλά σπάνια σε συνδυασμό με υψηλότερα επίπεδα οικολογικής πολυπλοκότητας όπως η κοινότητα, το τοπίο ή το οικοσύστημα. Η αλλαγή της κλίμακας στην ακουστική οικολογία, προήρθε με την ανάπτυξη ακουστικών δεικτών, που στοχεύουν στο να χαρακτηριστούν οι ακουστικές κοινότητες των ζώων και τα ηχητικά τοπία. Η χρήση ακουστικών δεικτών προτείνεται ως μια εύχρηστη, γρήγορη, μη παρεμβατική, καινοτόμα και χαμηλού κόστους επιλογή στην αποτίμηση της βιοποικιλότητας. Σε αυτή την εργασία έχει γίνει μια εκτενής ανασκόπηση των επιστημονικών άρθρων των τελευταίων χρόνων, που εξετάζουν τους ακουστικούς δείκτες. Μέσα από αυτή την ανασκόπηση παρουσιάζουμε και αξιολογούμε αυτούς τους δείκτες, ως μέτρο εκτίμησης της βιοποικιλότητας. Αναλύονται και αξιολογούνται 28 ακουστικοί δείκτες βιοποικιλότητας και εξετάζουμε διάφορες παθητικές ακουστικές μεθόδους, που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των ακουστικών δεικτών. Έχει γίνει διαχωρισμός των δεικτών σε δυο ομάδες ποικιλομορφίας. Στους δείκτες που εφαρμόζονται εντός της ομάδας και στους δείκτες που εφαρμόζονται μεταξύ των ομάδων, που αποτελούν μονάδα δειγματοληψίας ως χώρο, ενδιαιτήματος ή χρονικού συμβάντος. Η ποικιλομορφία εντός της ομάδας ονομάστηκε α ποικιλομορφία και η μεταξύ των ομάδων β ποικιλομορφία. Επίσης θέτουμε 12 κριτήρια επιλογής ενός ακουστικού δείκτη, με βάση την απόδοση και τα αποτελέσματα των δεικτών που υπάρχουν σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά. Τα προκαταρκτικά αποτελέσματα ήταν πολλά υποσχόμενα. Ωστόσο, πριν οι δείκτες μπορέσουν να εφαρμοστούν ευρέως, κρίνεται απαραίτητο να κατανοήσουμε πλήρως σε

ποιο βαθμό αντανakλούν τις κοινότητες που εφαρμόζονται και πώς εκτελούνται κάτω από διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Σε αυτή την εργασία προτείνουμε την εφαρμογή των ακουστικών δεικτών σε συνδυασμό μεταξύ τους, αλλά και με τους κλασικούς δείκτες βιοποικιλότητας. Με αυτό τον τρόπο μεγιστοποιούμε την πιστότητα των αποτελεσμάτων μας σε κάθε περίπτωση.

SUMMARY

These days, human-driven activities have been affecting biodiversity more than ever. As a result, the importance of tools being able to effectively monitor the changes at the communities is all the more highlighted. Up until now, the science of acoustic ecology had been focusing on the individual behavior in relation to the population and species of progressive levels rather than in combination with higher levels of ecologic complexity like the community, the landscape and the ecosystem. The scale change in acoustic ecology stemmed from the evolution in acoustic indicators aiming at characterizing animals' acoustic communities and acoustic landscapes. This thesis aims at providing a detailed overview of scientific articles that look into acoustic indicators of the last years. The use of acoustic indicators is suggested as an easy to use, fast, non-intrusive, innovative and low-cost choice in biodiversity assessment. Through this review we present and evaluate these indicators as a means to evaluate biodiversity. 28 acoustic biodiversity indicators have been examined and evaluated, alongside with various passive acoustic methods which are being used for the evaluation of acoustic indicators. The latter have been divided into two groups of biodiversity; the one relates to indicators being implemented within the group and the other being implemented among the groups comprising a sample taken from an area, habitat or time event as a unit. First group of biodiversity was named "biodiversity a", whereas, second group was named "biodiversity b". Additionally, we have set 12 selection criteria of an acoustic indicator on the basis of the performance and the results of the indicators available in international scientific journals. Preliminary findings were very promising. Nevertheless, prior to these indicators being widely implemented, we deem that it is necessary that the extent to which the indicators reflect the communities within which they are being used, as well as, the way of implementation under different environmental circumstances, are being fully understood. In this thesis, we propose that acoustic indicators be implemented both combined with each other, as well as, with the classic biodiversity indicators. Thus, the maximization of the credibility of our results, is, in any case, ensured.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αυξανόμενη αστικοποίηση οδηγεί σε αυξημένο κατακερματισμό των οικοτόπων, καθώς η παραμένουσα βλάστηση χάνεται για την επέκταση της οικιστικής ανάπτυξης και τα δάση διαχωρίζονται από τους δρόμους και τις εθνικές οδούς (Susan Fuller et al. 2015). Οι απώλειες και ο κατακερματισμός των οικοτόπων παράγουν μια σειρά αλλαγών μεγάλης κλίμακας, που εμπειριέχουν αυξημένες αναλογίες απομόνωσης και άκρων σε περιοχές μεταξύ ενός αυξημένου αριθμού μικρών επιπέδων οικοτόπων (Fahrig, 2003, Watson et al., 2005). Ο κατακερματισμός μπορεί επίσης να εμποδίσει την αναπαραγωγή και τη διασπορά οργανισμών (Addicott et al., 1987), να αυξήσει την ευαισθησία των πληθυσμών σε στοχαστικά γεγονότα (Driscoll et al., 2012) και να προκαλέσει μακροπρόθεσμη αλλαγή του κλίματος (Opdam and Wascher, 2004, Fischer and Lindenmayer, 2006, Ockinger et al., 2012).

Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στο περιβάλλον που προκαλείται από τη συσσώρευση αερίων θερμοκηπίου ανθρωπογενούς προέλευσης στην ατμόσφαιρα τεκμηριώνονται εκτενώς από την επιστημονική έρευνα (IPCC, 2013). Η ανθρωπογενής επίδραση στο κλίμα της Γης έχει σύνθετες επιπτώσεις στο πλάτος και το ύψος σε όλες τις κλίμακες από μεμονωμένα είδη που εισέρχονται σε λοταρία νικητών και ηττημένων (Moss, 1998) μέσω κάποιων βιομεταβλητών (IPCC, 2014), δημιουργώντας μεγάλες επιπτώσεις στη ταχύτητα με την οποία εμφανίζονται τέτοιες αλλαγές, εμποδίζοντας την πλειοψηφία των ειδών να προσαρμοστούν (Parmesan, 2006). Οι σύνθετες αλληλεπιδράσεις που προκαλούνται από τα ακραία γεγονότα που σχετίζονται με την αλλαγή του κλίματος έχουν ισχυρό αντίκτυπο μέσα στις τροφικές αλυσίδες με καταρρακτώδεις επιδράσεις, όπως η μη αναστρέψιμη αλλοίωση των οικοτόπων, η ταχεία εξαφάνιση ειδών και οι δραματικές αλλαγές σε ολόκληρες κοινότητες όπου εμπλέκονται διαφορετικά είδη (Easterling et al., 2000, Alois and Cheng, 2007).

Η αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας αναμένεται να έχει σημαντικό αντίκτυπο στις τροπικές περιοχές για τα χερσαία εξώθερμα ζώα και οι μικρές αλλαγές της θερμοκρασίας μπορεί να έχουν επιβλαβείς συνέπειες σε μεγάλο αριθμό ειδών. Για παράδειγμα, στον Ισημερινό, διαπιστώθηκε ότι η θερμοκρασία αποτελεί έναν παράγοντα για διακρίσεις σε είδη τριζονιών σε δασικά οικοσυστήματα. Στα τροπικά δάση, η μεταβολή της θερμοκρασίας θα μπορούσε να έχει τραγικές συνέπειες όσον αφορά τη κατανομή των ειδών (B. Krause & A. Farina, 2016; Nischck & Riede, 2001). Επίσης η θερμοκρασία του περιβάλλοντος έχει φανεί πως επηρεάζει την αναλογία φύλου κάποιων ειδών. Για παράδειγμα, στον πληθυσμό των θαλάσσιων χελωνών των νότιων Ηνωμένων Πολιτειών, αναμένεται μεγαλύτερος αριθμός θηλυκών λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας μόνο κατά 1 ° C (Hawkes et al., 2007). Ωστόσο, τα είδη που ζουν σε μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη έχουν μια ευρύτερη

θερμική ανοχή επειδή ζουν σε ψυχρότερες περιοχές από το φυσιολογικό τους βέλτιστο (*Deutsch et al., 2008*).

Η αλλαγή του κλίματος παρακολουθείται συνεχώς λόγω της εκτεταμένης εφαρμογής προηγμένων τεχνολογιών τηλεανίχνευσης που μπορούν να καλύψουν ολόκληρο τον πλανήτη με κοινή χωρική και χρονική ανάλυση. Οι νέες τεχνολογίες τηλεανίχνευσης βασίζονται στην έρευνα της ατμοσφαιρικής φυσικής, της χημείας των υδάτων και των παραμέτρων της βλάστησης (*B. Krause & A. Farina, 2016*). Η πλειονότητα των μελετών σχετικά με τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στους οργανισμούς βασίζεται ακόμη σε προγνωστικά μοντέλα μεγάλης κλίμακας για την αντιμετώπιση των αβιοτικών πληροφοριών από δορυφορικούς αισθητήρες, όπως υποστηρίζεται σε μια πρόσφατη ανασκόπηση του *Crick (2004)*, αν και ορισμένα βιοκλιματικά μοντέλα είναι αρκετά ακριβή (*Williams et al., 2003*).

Μέσα σε αυτό το πλαίσιο των σημαντικών προκλήσεων, που καλούνται οι οικολόγοι και συγκεκριμένα οι επιστήμονες της διατήρησης να αντιμετωπίσουν, γεννήθηκε η ανάγκη για εξεύρεση νέων επιστημονικών εργαλείων στην αντιμετώπιση αυτών των καιρίων ζητημάτων στη διαχείριση της διατήρησης βιοποικιλότητας. Η οικολογική ακουστική, είναι ένας διεπιστημονικός κλάδος της οικολογίας που αποσκοπεί στο να συμβάλλει στην αντιμετώπιση τριών σημαντικών προκλήσεων της σύγχρονης οικολογίας: την παρακολούθηση της βιοποικιλότητας, την κατανόηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των ειδών και την αποτίμηση της ανθρωπογενούς ηχητικής επιρροής στο περιβάλλον (*J. Sueur et al. 2014*). Η οικολογική ακουστική αφορά τη μελέτη του οικολογικού περιεχομένου του ήχου σε ένα ευρύ φάσμα χωρικής και χρονικής κλίμακας ώστε να αντιμετωπιστούν οικολογικά ζητήματα όπως η διαχείριση της βιοποικιλότητας. Η οικολογική ακουστική αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε με σκοπό την αξιολόγηση βιοποικιλότητας αξιοποιώντας δεδομένα ηχοτοπίου. Το γεγονός πως κάθε αλλαγή στο περιβάλλον έχει άμεσο αντίκτυπο στην ακουστική συμπεριφορά των οργανισμών, καθιστά τους ήχους σημαντικό εργαλείο ανίχνευσης συμπεριφορικών διαφοροποιήσεων που συνδέονται και με την κλιματική αλλαγή σε κλίμακα μεμονωμένων ειδών, πληθυσμών, κοινοτήτων και τοπίων (*Krause & Farina, 2016*).

Η βιοακουστική ορίζεται ως ο επιστημονικός κλάδος της οικολογίας που μελετά την εκπομπή, τη διάδοση και την υποδοχή του ήχου που παράγεται από τα ζωικά είδη. Αυτός ο ορισμός έχει την προέλευσή του στο πρότυπο *Shannon and Weaver (C. E. Shannon, W. Weaver 1949)*, που περιγράφει την επικοινωνία ως δίδυμο πομπού - δέκτη που μοιράζεται πληροφορίες κωδικοποιημένες σε ένα σήμα. Από την άποψη της ακουστικής, ένα άτομο (ο πομπός) παράγει έναν μηχανικό κραδασμό που ενσωματώνει πληροφορίες (το σήμα) που μεταδίδεται μέσω ενός μέσου (αέριο, στερεό και υγρό) και λαμβάνεται από άλλο άτομο (δέκτη). Η λήψη του σήματος μπορεί να αλλάξει τη συμπεριφορά ή τη φυσιολογία του δέκτη. Οι πληροφορίες κωδικοποιούνται από τον πομπό και αποκωδικοποιούνται από τον δέκτη μέσω του σήματος.

Αυτή η έννοια είναι εξαιρετικά εποικοδομητική, καθώς οικοδομεί μια απλή γραμμική αλυσίδα γεγονότων που προσδιορίζονται και οριοθετούνται με σαφήνεια (εκπομπή, διάδοση, λήψη). Αυτό εξηγεί γιατί πολλές βιοακουστικές μελέτες αναφέρονται, άμεσα ή έμμεσα, στο πρότυπο εκπομπού-δέκτη. Ωστόσο, αυτό το σχήμα θα μπορούσε επίσης να θεωρηθεί ως μια μάλλον στενή έννοια, καθώς υποδηλώνει ότι η επικοινωνία απλά λειτουργεί ως ένα κλειστό σύστημα μεταξύ δύο ατόμων που μοιράζονται μια διαδικασία κωδικοποίησης - αποκωδικοποίησης. Οι μελέτες σε ήχους χορωδιών (choruses) αποκάλυψαν σαφώς ότι η επικοινωνία είναι δομημένη σε ένα δίκτυο και όχι σε μια επικοινωνιακή σχέση ενός προς ένα (ανασκόπηση γίνεται στο *M. D. Greenfield 2002, P. K. McGregor 2005*). Ο πομπός και ο δέκτης σχηματίζουν σπάνια ένα απομονωμένο ζεύγος αλλά μάλλον συνδυάζονται σε ένα κομμάτι ενός ιστού επικοινωνίας που περιστρέφεται από διάφορους εκπομπούς και δέκτες όπως συμβαίνει σε χορωδίες (choruses) (*T. U. Grafe 2005*). Ο κύριος όγκος των μελετών που ασχολούνται με τον άνθρωπο, σχετίζεται κυρίως με τις ιατρικές επιστήμες και τη μουσικολογία που μελετούν την ανθρώπινη φωνή, την ακρόαση ή τη μουσική αντίστοιχα.

Ιστορικά, η οικολογία είναι η επιστήμη που εξετάζει τις αλληλεπιδράσεις των οργανισμών με το περιβάλλον τους, συμπεριλαμβανομένων τόσο των βιοτικών όσο και των αβιοτικών παραγόντων. Παρόλο που η οικολογία καλύπτει ουσιαστικά όλες τις οργανωτικές κλίμακες, από τα γονίδια έως τα οικοσυστήματα, η βιοακουστική διερευνά κυρίως συγκεκριμένα και ειδικά επίπεδα. Η βιοακουστική έρευνα οδήγησε σε χρήσιμα εργαλεία για την παρακολούθηση της ακουστικής δραστηριότητας των ειδών, του πληθυσμού και ακόμη και των ατόμων τόσο στα θαλάσσια όσο και στα χερσαία ενδιαιτήματα (*C. Huetz, T. Aubin 2002*). Ωστόσο, η βιοακουστική παρουσίαζε ελάχιστο ενδιαφέρον για υψηλότερα επίπεδα όπως η κοινότητα, το οικοσύστημα και το τοπίο. Αυτή η αναντιστοιχία κλίμακας μεταξύ της βιοακουστικής και της οικολογίας μπορεί να εξηγήσει γιατί σπάνια συναντήθηκαν οι δύο αυτοί κλάδοι: η βιοακουστική θεωρείται ως μέρος της επιστήμης των ζώων, όχι της οικολογίας.

Με την πάροδο του χρόνου, μια αλλαγή κλίμακας στην βιοακουστική επιτεύχθηκε πρόσφατα προσπαθώντας να σμικρυνθούν οι ήχοι που παράγουν ολόκληρες κοινότητες ή να εξετάσουν τα συνολικά ακουστικά στοιχεία ενός τοπίου, γνωστό καλύτερα ως ηχοτοπίο (*B. Krause 2008, B. Pijanowski, A. Farina, S. Gage, S. Dumyahn, B. Krause 2011, B. Pijanowski, L. J. Villanueva-Rivera, S. L. Dumyahn, A. Farina, B. L. Krause, B. M. Napolitano, S. H. Gage, N. Pieretti 2011*). Ένα τοπίο μπορεί να οριστεί ως μια γεωγραφική περιοχή που χαρακτηρίζεται από χωρικούς χαρακτήρες (μοτίβα) που επηρεάζουν τη σύνθεση και τη κατανομή μεμονωμένων ειδών, των πληθυσμών και των κοινοτήτων (*R. T. T. Forman, M. Godron 1986*), μιας πολιτιστικής οντότητας (*Z. Naveh, A. S. Lieberman 1984*) ή μιας γνωσιακής διάστασης ειδικής για τα είδη (*A. Farina 2010*). Παρά την διαφορετική επιστημική προοπτική που χρησιμοποιείται για τον ορισμό ενός τοπίου, όλοι οι ήχοι που υπάρχουν σε ένα τοπίο παράγουν ένα ηχοτοπίο που ορίζεται από τους Pijanowski et al. (2011) (*B. Pijanowski, A. Farina, S. Gage, S. Dumyahn, B. Krause 2011, B. Pijanowski, L. J. Villanueva-Rivera, S. L. Dumyahn, A.*

Farina, B. L. Krause, B. M. Napolitano, S. H. Gage, N. Pieretti 2011) ως "η συλλογή βιολογικών, γεωφυσικών και ανθρωπογενών ήχων που προέρχονται από ένα τοπίο και οι οποίες ποικίλλουν στο διάστημα και στο χρόνο". Το ηχοτοπίο διαιρείται επομένως σε τρία βασικά στοιχεία: τη βιοφωνία (βιολογικός παραγόμενοι ήχοι), τη γεωφωνία (γεωφυσικά παραγόμενοι ήχοι) και την ανθρωποφωνία (ήχοι που παράγει ο άνθρωπος) (B. Pijanowski, A. Farina, S. Gage, S. Dumyahn, B. Krause 2011, B. Pijanowski, L. J. Villanueva-Rivera, S. L. Dumyahn, A. Farina, B. L. Krause, B. M. Napolitano, S. H. Gage, N. Pieretti 2011). Η βιοφωνία αναφέρεται στους ήχους που παράγουν ζωντανοί οργανισμοί, συνήθως οι ήχοι που χρησιμοποιούνται από τα ζώα ως μέσο επικοινωνίας. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει πτηνά, αμφίβια, έντομα, θηλαστικά, ψάρια και αμφίποδα σε χερσαία και υδρόβια συστήματα. Η γεωφωνία είναι η συλλογή ήχων που προκαλούνται από φυσικές διαδικασίες όπως ο άνεμος, η ροή του νερού, οι βροντές, οι βροχοπτώσεις και η μετακίνηση της γης. Ο ήχος που δημιουργείται όταν οι άνθρωποι χρησιμοποιούν μηχανικές συσκευές αναφέρεται ως ανθρωποφωνία (ή τεχνοφωνία). Περιλαμβάνονται οι ήχοι που προέρχονται από σταθερές μηχανές όπως ανεμιστήρες και κλιματιστικά και κινητές μηχανές που χρησιμοποιούνται για μεταφορές και κατασκευές όπως αεροσκάφη, αυτοκίνητα, φορτηγά, βάρκες, γερανοί, μπουλντόζες κ.λπ. Σε αντίθεση με το βιοακουστικό ενδιαφέρον για μεμονωμένα είδη, υπάρχει ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για την οικολογία του ηχοτοπίου, δηλαδή τη μελέτη της χρονικής και χωρικής κατανομής του ήχου μέσα από ένα τοπίο, που αντανακλά σημαντικές οικοσυστημικές διεργασίες και ανθρώπινες δραστηριότητες (Kasten et al., 2012 · Pijanowski κ.ά., 2011a, 2011b). Από αυτή την προοπτική, το ηχοτοπίο είναι ένας πεπερασμένος πόρος στον οποίο οι οργανισμοί (συμπεριλαμβανομένων των ανθρώπων) ανταγωνίζονται τον φασματικό χώρο (Krause, 2008). Σύμφωνα με τον Schafer (1977), ο οποίος ήταν ο αρχικός εκφραστής της έννοιας του ηχοτοπίου, η ηχητική προσέγγιση υποδηλώνει ότι πρέπει να προσπαθήσουμε να ακούσουμε το φυσικό ακουστικό περιβάλλον ως μουσική συμφωνία και επιπλέον ότι έχουμε την ευθύνη για τη σύνθεση και τη διατήρησή του από τον μεγαλύτερο εχθρό του: τη ρύπανση που παράγεται από τον θόρυβο. Τα τελευταία χρόνια ειδικότερα, η αύξηση του ανθρώπινου μηχανικού θορύβου (η ανθρωποφωνία) τείνει να καλύπτει τις λεπτές υφές του φυσικού ακουστικού περιβάλλοντος, αναγκάζοντας τα έκδηλα φωνητικά είδη να μεταθέτουν ή να ενεργοποιούν ασυνήθιστες προσαρμογές (Dooling and Popper 2007, Nemeth and Brumm 2009 · Rheindt 2003 · Slabbekoorn & Peet 2003).

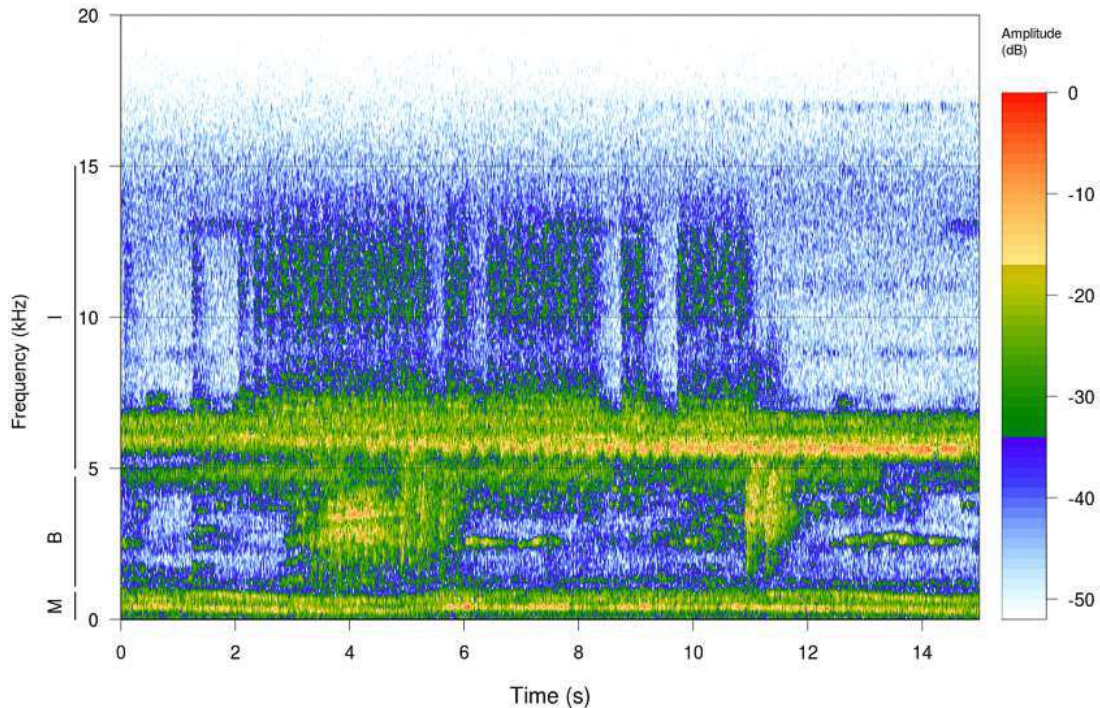
Στην οικολογία, μια κοινότητα μπορεί να οριστεί ως ένα σύνολο ή συλλογή αλληλεπιδρώντων ειδών που βρίσκονται σε μια συγκεκριμένη καθορισμένη περιοχή ή ένα ενδιαίτημα (J. Roughgarden, J. Diamond 1986, P. J. Morin 1999). Κάτω από αυτό το πρίσμα, ακουστική κοινότητα είναι μια συνάθροιση των φωνητικών ζώων ακουστικά ενεργά σε μια δεδομένη τοποθεσία και μια συγκεκριμένη ώρα. Αυτά τα είδη μπορεί να ανταγωνίζονται ή να συνεργάζονται για περιορισμένο ακουστικό χώρο (H. Slabbekoorn 2004, A. A. Chek, J. P. Bogart, S. C. Loughheed 2003, A. Amézquita, S. V. Flechas, A. P. Lima, A. H. Gasser, W. Hödl 2011, A. K. D. Schmidt, H. Römer, K. Riede 2012, A. Gasc, J. Sueur, S. Pavoine, R. Pellens, P. Grandcolas 2013). Ο

όρος "ακουστική κοινότητα" μπορεί να βρεθεί στη βιβλιογραφία πολλών επιστημονικών κλάδων: τέχνη, ηχητική τεχνολογία και κοινωνιολογία, βιολογία (βιοακουστική), οικολογία και, ειδικότερα, οικοακουστική. Ο συνθέτης, συγγραφέας, εκπαιδευτικός μουσικής και περιβαλλοντολόγος, R. Murray Schafer, ο οποίος δημιούργησε τη λέξη "ηχοτοπίο", ισχυρίστηκε ότι μια ακουστική κοινότητα μπορεί να οριστεί ως "πολιτική, γεωγραφική, θρησκευτική ή κοινωνική οντότητα" στην οποία η ανθρώπινη φωνή λειτουργεί ως κύριο εργαλείο για τον καθορισμό των ορίων της κοινότητας (*Schafer, 1977: 215*). Ένας άλλος ερευνητής ο Truax (*1984: 58*), όρισε μια ακουστική κοινότητα ως: κάθε σκηνικό ήχου στο οποίο οι ακουστικές πληροφορίες διαδραματίζουν διαδεδομένο ρόλο στις ζωές των κατοίκων (ανεξάρτητα από το πώς γίνεται κατανοητό από τη κοινότητα των ανθρώπων αυτών). Ως εκ τούτου, τα όρια της κοινότητας είναι αυθαίρετα και μπορεί να είναι τόσο μικρά όσο ένα δωμάτιο ανθρώπων, ένα σπίτι ή ένα κτίριο ή τόσο μεγάλο όσο μια αστική κοινότητα, μια περιοχή εκπομπής ή οποιοδήποτε άλλο σύστημα ηλεκτροακουστικής επικοινωνίας. Με λίγα λόγια, είναι οποιοδήποτε σύστημα στο οποίο ανταλλάσσονται ακουστικές πληροφορίες. Η έμφαση αυτών των δύο ορισμών βρίσκεται σταθερά μέσα στον ανθρώπινο χώρο, αλλά η τελευταία πρόταση στον ορισμό του Truax είναι ενδιαφέρουσα, καθώς αναφέρεται στην ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ μελών μιας κοινότητας. Εκτός από αυτή την ανθρώπινη σκοπιά, υπάρχει μια κοινωνικο-οικολογική προοπτική που συνδυάζει τους ανθρώπους και την άγρια φύση (*Ritts et al., 2016*).

Μέχρι σήμερα η εκτίμηση της βιοποικιλότητας ενός ενδιαιτήματος και η αξιολόγηση της ακουστικής δραστηριότητας ενός ηχοτοπίου, γίνεται με επιτόπιες καταγραφές πεδίου, από έμπειρους οικολόγους της διατήρησης, όπου οι επιστήμονες βγάζουν τα συμπεράσματά τους, βάση των καταγραφών τους στο πεδίο, μέσω της παρατήρησης, της άμεσης συλλογής ή της παγίδευσης. Μια διαδικασία με περιορισμένη χωρική κατανομή της έρευνας, που είναι χρονοβόρα με μεγάλα κόστη και αυξημένη πιθανότητα σφάλματος στα αποτελέσματα των μετρήσεων. Η αλλαγή της κλίμακας στην βιοακουστική υποστηρίζεται από την πρόσφατη ανάπτυξη ψηφιακών αυτόνομων καταγραφικών ηχοσυστημάτων που μπορούν να συλλέξουν με αυτόνομο τρόπο την ακουστική δραστηριότητα που προέρχεται από χερσαία, θαλάσσια και υδάτινα περιβάλλοντα (*M. A. Acevedo, L. J. Villanueva-Rivera 2006*) (Εικόνα 1 και σχήμα 1). Αυτές οι συσκευές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μεγάλους αριθμούς για να καλύψουν σημαντικές περιοχές και μεγάλες χρονικές περιόδους. Η τεχνολογία αυτή για πρώτη φορά επιτρέπει την αυτόματη δειγματοληψία της ακουστικής δραστηριότητας των ζωικών κοινοτήτων και των ήχων στα τοπία. Αυτό, με τη σειρά του, επιτρέπει την αντιμετώπιση οικολογικών ζητημάτων και ζητημάτων διατήρησης σε οικολογικό επίπεδο.



Εικόνα 1. Καταγραφή πεδίου ακουστικών κοινοτήτων. Ένα αυτόνομο ψηφιακό καταγραφικό (SM2, wildlife acoustics) εγκαθίσταται στο τροπικό δάσος Nouragues στη Γαλλική Γουιάνα με ένα μικρόφωνο σε ύψος 150 cm και ένα μικρόφωνο είναι έτοιμο να τοποθετηθεί στο θόλο σε ύψος 20 μέτρων. (A. Rodriguez, A. Gasc, S. Pavoine, P. Grandcolas, P. Gaucher, J. Sueur 2014)



Σχήμα 1. Δείγμα ηχογράφησης ενός ηχοτοπίου. Φασματογράφημα μιας ηχογράφησης που έγινε στη περιοχή Nouragues στη Γαλλική Γουιάνα στις 12 Δεκεμβρίου 2010 στις 6:30 πμ (σημείο 04°05'18.99'' N, 52°40'27.68'' W). Η καταγραφή περιλαμβάνει ένα είδος θηλαστικού (Αλουάτα, M) και πολλά είδη πουλιών και εντόμων με γραμμές που δείχνουν κατά προσέγγιση αντίστοιχες ζώνες συχνοτήτων. Προδιαγραφές φασματοσκοπίας: 512 δείγματα μη επικαλυπτόμενα παράθυρα Hamming με δυναμική περιοχή 52 dB (A. Rodriguez, A. Gasc, S. Pavoine, P. Grandcolas, P. Gaucher, J. Sueur 2014)

Στις μέρες μας, η μελέτη του ηχοτοπίου των ζώων αντιπροσωπεύει ένα πεδίο αυξανόμενου ενδιαφέροντος λόγω των συνεπειών που έχει για την αξιολόγηση των αλληλεπιδράσεων ανθρώπου-τοπίου. Η χρήση ακουστικών εργαλείων στη διατήρηση της βιοποικιλότητας δεν είναι καινούργια (Batista and Gaunt, 1997), αλλά πρόσφατα αυξήθηκε, ιδιαίτερα στο πλαίσιο της διαχείρισης μεγάλων περιοχών άγριας φύσης (Dumyahn και Pijanowski, 2011, Farina, 2014, Laiolo, 2010). Υπάρχει αυξανόμενη ζήτηση από τους διαχειριστές πάρκων και τους τοπικούς φορείς λήψης αποφάσεων για την καλύτερη κατανόηση του σχεδιασμού της ηχητικής δειγματοληψίας και της αυτοματοποιημένης ανάλυσης του ήχου. Αυτός ο υψηλός βαθμός ενδιαφέροντος εξηγείται εν μέρει από τη διαθεσιμότητα αυτόνομων και ανθεκτικών στις καιρικές συνθήκες συσκευών εγγραφής, οι οποίες είναι όλο και πιο οικονομικά και τεχνικά προσβάσιμες στις τοπικές και περιφερειακές αρχές. Τα ηχογραφημένα δεδομένα μπορούν να συμβάλλουν σε μια σειρά από οικολογικές έρευνες στην αναγνώριση των έκδηλων φωνητικά ζώων. Τα είδη πτηνών εξετάζονται τακτικά λόγω της σημασίας τους ως δείκτη περιβαλλοντικής υγείας (Gregory and Strien, 2010). Σήμερα υπάρχει ένας

σημαντικός αριθμός δημοσιευμένων ερευνών για την ανίχνευση των κλήσεων των πτηνών (*Acevedo et al., 2009, Agranat, 2009, Anderson et al., 1996, Brandes, 2008, Chen and Maher, 2006, Digby et al., 2013 · Juang and Chen, 2007 · McIlraith and Card, 1997 · Somervuo et al., 2006*).

Δυστυχώς, η μελέτη του ηχοτοπίου εξακολουθεί να είναι ένα δύσκολο θέμα που πρέπει να διερευνηθεί, λόγω της μεγάλης ποικιλίας των διαθέσιμων πληροφοριών σε κάθε ακουστικό περιβάλλον και της δυσκολίας που υπάρχει για τον εντοπισμό δεικτών με τους οποίους μπορεί να ερμηνευτεί γρήγορα το ευρύ φάσμα των δεδομένων μιας ακουστικής εγγραφής. Είναι γεγονός πως, παρά την ανάπτυξη των νέων τεχνολογιών και των λογισμικών που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια, η ανάλυση των φυσικών ήχων παραμένει συχνά χρονοβόρα διαδικασία και αυτό μειώνει τη δυνατότητα εξαγωγής χρήσιμων οικολογικών δεδομένων από αυτό το ευρέως πλούσιο πληροφοριακό πλαίσιο. Πολλοί συγγραφείς έχουν παράγει επιτυχώς τεχνικές που βασίζονται σε βιοακουστικά συνθήματα ενός και μόνο είδους (*Bardeli et al., 2010, Frommolt et al., 2008, Klinck et al., 2008, Wolf, 2009*) για την παρακολούθηση ολόκληρων ζωικών κοινοτήτων (*Sueur et al., 2008a, b*). Οι περισσότερες μέθοδοι απαιτούν δειγματοληψία δεδομένων μεγάλης κλίμακας σε διάφορες τοποθεσίες και ημερομηνίες. Ωστόσο, οι παραδοσιακές μέθοδοι δειγματοληψίας βασίζονται κυρίως σε αργούς καταλόγους που μπορεί να μην προσαρμόζονται σε ταχεία αξιολόγηση σε μεγάλες κλίμακες, ιδιαίτερα όταν ασχολούνται με πολύ διαφορετικές ομάδες όπως τα αρθροπόδα (*Basset et al., 2000, Lawton et al., 1998*). Επιπλέον, αυτές οι μέθοδοι δειγματοληψίας είναι στις περισσότερες περιπτώσεις επεμβατικές, καθώς βασίζονται στην άμεση συλλογή ή παγίδευση (*Sutherland, 1996, Hill et al., 2005*).

Παθητική ακουστική παρακολούθηση ((Passive Acoustic Monitoring (PAM))

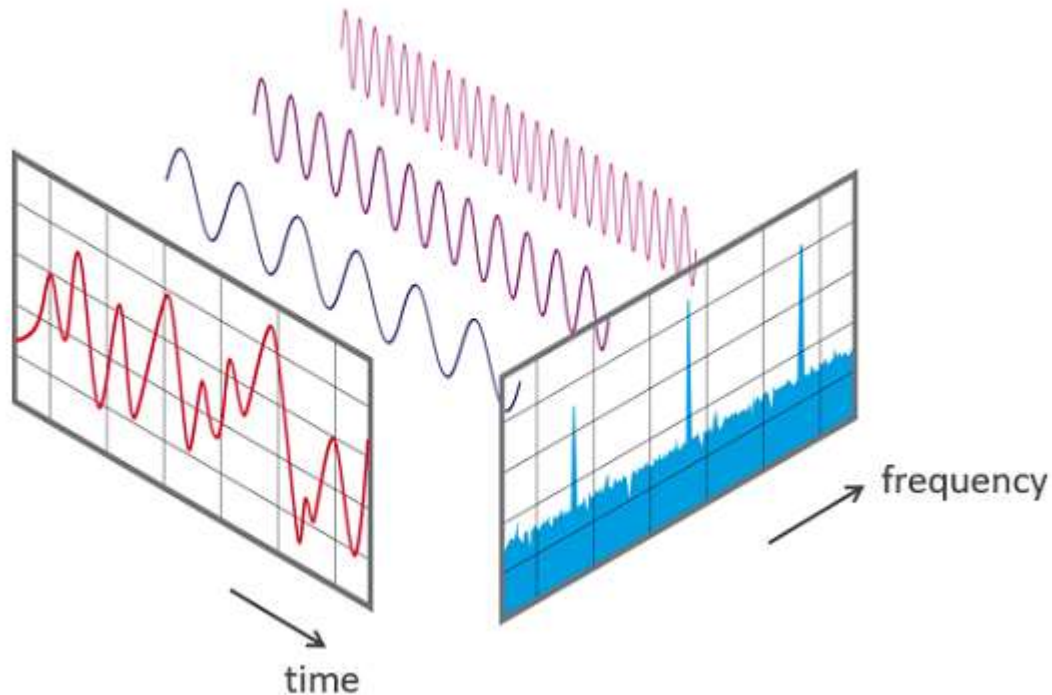
Σήμερα, η παθητική ακουστική παρακολούθηση ((Passive Acoustic Monitoring (PAM)) θεωρείται ανεκτίμητο εργαλείο τόσο για την έρευνα όσο και για τη διαχείριση. Η PAM συλλέγει ακουστικά δεδομένα σε μεγάλες χωρικές και χρονικές κλίμακες και παρέχει λεπτομερείς, μακροπρόθεσμες πληροφορίες σχετικά με τη κατανομή των ζώων και τις διακυμάνσεις της δυναμικής της κοινότητας. Αυτή η ευρεία συλλογή δεδομένων οδηγεί αναπόφευκτα σε καλύτερη κατανόηση και καλύτερη διαχείριση των πληθυσμών των ζώων. Τα πιο βασικά πλεονεκτήματα των ακουστικών αισθητήρων περιλαμβάνουν τη μεγάλη απόσταση, την υψηλή πιστότητα και την παθητική λειτουργία. Σε σύγκριση με τις οπτικές τεχνολογίες όπως οι παγίδες κάμερας ή τα συστήματα παρακολούθησης βίντεο, τα ηχητικά συστήματα προσφέρουν κάλυψη προς όλες τις κατευθύνσεις που δεν περιορίζεται άμεσα από την ύπαρξη εμποδίων ή βλάστησης. Η απόδοση δεν περιορίζεται από το διαθέσιμο φως. Τα δεδομένα ήχου είναι πιο συμπαγή από το βίντεο και είναι συγκριτικά εύκολο να επεξεργαστούν αυτόματα. Υπάρχουν πολλά πακέτα λογισμικού που υποστηρίζουν την ανίχνευση και την ταξινόμηση των σημάτων των ζώων. Τα αυτόνομα συστήματα εγγραφής

μπορούν να είναι συμπαγή, παρουσιάζοντας ένα διακριτικό οπτικό αποτύπωμα και αμελητέο θόρυβο, επιπλέον η απομάκρυνση του ανθρώπου από το σύστημα συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση της διατάραξης της άγριας πανίδας και άλλων αντικειμένων της άμεσης παρατήρησης. Κάποια ακόμα πλεονεκτήματα που εμφανίζει η ακουστική παθητική παρακολούθηση σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους παρακολούθησης είναι: το χαμηλό κόστος δηγματοληψίας, η ευκολία στην χρήση των μηχανημάτων και των λογισμικών για την επεξεργασία των δεδομένων, η ευαισθησία τους σε πολλαπλά ταξινομικά είδη, η δυνατότητα κάλυψης σε μεγάλες χρονικές περιόδους και η ταχύτητα δηγματοληπτικών μετρήσεων. Η βασική αρχή στην οποία βασίζεται μια ταχεία ακουστική έρευνα είναι η ποσοτικοποίηση της παγκόσμιας ακουστικής μεταβλητότητας στον ήχο που προκύπτει από μια συλλογή ζώων (ή "ηχοτόπων" όπως ορίζεται στο Farina, 2014). Στη συνέχεια, ο "ήχος" αναφέρεται στην ακουστική παραγωγή ενός συνόλου διαφορετικών ειδών και το "τραγούδι" αναφέρεται στην ακουστική ακολουθία που παράγεται από ένα συγκεκριμένο είδος.

Η παθητική ακουστική παρακολούθηση αντιμετωπίζει διάφορες προκλήσεις. Η αύξηση της ευαισθησίας στην εξασθένιση με συχνότητα, η πιθανότητα διάθλασης για τον περιορισμό του εύρους ανίχνευσης και οι στρεβλωτικές επιδράσεις της διασποράς και των συστημάτων διάδοσης πολλαπλών διαδρόμων πρέπει να σχεδιάζονται και να τοποθετούνται για να καταγράφουν σήματα επαρκούς δύναμης και πιστότητας για ανάλυση. Ενώ πολλά ζώα έχουν διακριτικές υπογραφές, όλα τα βιολογικά σήματα είναι μεταβλητά και το φιλτράρισμα των κυματομορφών θα είναι σπάνια μια επιτυχημένη προσέγγιση. Οι μέθοδοι ταξινόμησης πρέπει να είναι σε θέση να διακρίνουν εντός και μεταξύ των διακυμάνσεων της τάξης. Μια επιπρόσθετη επιπλοκή είναι η διαλογή αλληλεπικαλυπτόμενων φωνών σε πυκνές χορωδίες. Πολλά είδη θα παράγουν το μεγαλύτερο μέρος των κλήσεων τους σε αυτό το πλαίσιο - χορωδίες της αυγής των πτηνών, νυκτερινές χορωδίες εντόμων και βατράχων. Η αποτελεσματική και αποδοτική υλοποίηση ενός έργου ακουστικής παρακολούθησης απαιτεί προσεκτική επιλογή του εξοπλισμού και του λογισμικού.

Μια ακόμη μέθοδος δειγματοληψίας η εναέρια τηλεπισκόπηση προσφέρει μια γρήγορη, υψηλής ανάλυσης και μη επεμβατική προσέγγιση για την ποσοτικοποίηση της βιοφυσικής δομής σε μια μεγάλη χωρική κατανομή (Lefsky *et al.*, 2002, Ustin *et al.*, 2004). Με γρήγορο ρυθμό, εξελίσσονται και οι ψηφιακές βιοακουστικές μετρήσεις της αφθονίας και της σύνθεσης των πτηνών και προσφέρουν μια ελκυστική εναλλακτική λύση στις παραδοσιακές ορνιθολογικές έρευνες (Haselmayer και Quinn 2000). Η συλλογή βιοακουστικών καταγραφών απαιτεί ελάχιστες δεξιότητες και μπορεί να αυτοματοποιηθεί για συχνή και μακροπρόθεσμη συλλογή βιοφωνιών (π.χ. κλήσεις πουλιών, τιπιβίσματα τριζονιών, κλήσεις βατράχων), κάτι που θα ήταν ιδιαίτερα πολύτιμο στις μελέτες των ταχέως μεταβαλλόμενων ή απομακρυσμένων οικοσυστημάτων. Οι αλγόριθμοι που απαιτούνται για την αυτόματη εξαγωγή λεπτομερών πληροφοριών σχετικά με τη σύνθεση της κοινότητας των πτηνών (δηλ. Ταυτοποίηση ειδών, αφθονία ειδών, πλούτος ειδών) από ψηφιακές καταγραφές βρίσκονται σήμερα σε φάση ανάπτυξης (Rempel *et al.*, 2005).

Ένας από αυτούς τους αλγόριθμους είναι και ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier ((Fast Fourier Transform (FFT)), ο οποίος είναι ένας αλγόριθμος που δειγματοληπτεί ένα σήμα σε μια χρονική περίοδο (ή χώρο) και το διαιρεί σε συνιστώσες της συχνότητας του (Van Loan, Charles 1992). Αυτές οι συνιστώσες είναι μοναδικές ημιτονοειδείς ταλαντώσεις σε ξεχωριστές συχνότητες κάθε μία με το δικό της εύρος και φάση. Αυτός ο μετασχηματισμός απεικονίζεται στο Διάγραμμα 1. Κατά την χρονική περίοδο που μετρείται στο διάγραμμα 1, το σήμα περιέχει 3 διακριτές κυρίαρχες συχνότητες.



Διάγραμμα 1. Προβολή σήματος στα πεδία του χρόνου και της συχνότητας

Ένας αλγόριθμος FFT υπολογίζει τον χωριστό μετασχηματισμό Fourier ((Discrete Fourier Transform(DFT)) μιας ακολουθίας ή τον αντίστροφο γρήγορο μετασχηματισμό Fourier ((Inverse Fast Fourier transform(IFFT))). Η ανάλυση Fourier μετατρέπει ένα σήμα από το αρχικό του πεδίο σε μια αναπαράσταση στο πεδίο συχνοτήτων και αντίστροφα. Ένα FFT υπολογίζει γρήγορα τέτοιους μετασχηματισμούς παράγοντας το μωσαϊκό DFT σε ένα προϊόν από σποραδικές (κυρίως μηδενικές) συνιστώσες. Ως αποτέλεσμα, καταφέρνει να μειώσει την πολυπλοκότητα του υπολογισμού του DFT από το $O(n^2)$, το οποίο προκύπτει αν εφαρμοστεί απλά ο ορισμός του DFT από το $O(n \log n)$, όπου n είναι το μέγεθος των δεδομένων.

Οι γρήγοροι μετασχηματισμοί Fourier χρησιμοποιούνται ευρέως για πολλές εφαρμογές στη μηχανική, τις φυσικές επιστήμες και τα μαθηματικά. Οι βασικές ιδέες ήταν δημοφιλείς το 1965, αλλά ορισμένοι αλγόριθμοι είχαν προέλθει ήδη από το 1805 (Heideman et al. 1984) Το 1994, ο Gilbert Strang περιγράφει το FFT ως «τον σημαντικότερο αριθμητικό αλγόριθμο της ζωής μας» (Kent et al. 2002) και συμπεριλήφθηκε στους Top 10 αλγόριθμους του 20ου αιώνα από το

περιοδικό του Ινστιτούτου Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών ((Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)), *Computing in Science & Engineering (Dongarra et al. 2000)*).

Τα τελευταία χρόνια, έχει αυξηθεί το ενδιαφέρον για τη χρήση περιβαλλοντικών ήχων για τη διερεύνηση της οικολογικής πολυπλοκότητας. Μερικές εμπειρικές ενδείξεις υποδεικνύουν ότι βιολογικοί και μη βιολογικοί ήχοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξέταση και ερμηνεία διαφόρων δυναμικών οικολογικών διεργασιών (*Towsey et al., 2014a*) και ως εκ τούτου έχουν προχωρήσει νέες προοπτικές στη θεωρητική και εφαρμοσμένη οικολογία. Μια τέτοια πρόοδος είναι η αναδυόμενη επιστήμη της οικοακουστικής, η οποία είναι η οικολογική έρευνα και ερμηνεία περιβαλλοντικών ήχων (*Sueur και Farina, 2015*). Το μαζικό σύνολο δεδομένων ήχου που συλλέγεται πρέπει να διαχειρίζεται και να αναλύεται με αποτελεσματικά ακουστικά εργαλεία. Συγκεκριμένα, η έρευνα στην οικολογία έχει μια παράδοση πολλών δεικτών που περιγράφουν με μία μόνο αξία την οικολογική πολυπλοκότητα από την κοινότητα στην κλίμακα τοπίου (π.χ. *W. J. Sutherland 1996*). Η απαίτηση για ακουστικά εργαλεία οδηγεί στην ταυτόχρονη ανάπτυξη οικολογικών δεικτών ακουστικής βάσης που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της βιοποικιλότητας, σε έρευνες σχετικά με τη δυναμική της κοινότητας και τα τοπικά πρότυπα. Στόχος αυτής της εργασίας είναι να γίνει ανασκόπηση και σχολιασμός των ακουστικών δεικτών που είναι διαθέσιμοι στην βιβλιογραφία, ώστε να αξιολογηθούν ως εργαλεία για την επιστήμη της διατήρησης της βιοποικιλότητας. Η χρήση ακουστικών δεικτών προτείνεται ως μια εύχρηστη, γρήγορη, μη επεμβατική, καινοτόμα και χαμηλού κόστους επιλογή στην αποτίμηση της βιοποικιλότητας, μάλιστα τα τελευταία χρόνια τουλάχιστον 28 διαφορετικοί ακουστικοί δείκτες βιοποικιλότητας έχουν προταθεί. Οι βάσεις δεδομένων που χρησιμοποιήσαμε σε αυτή την εργασία, για την εξεύρεση άρθρων για τους ακουστικές δείκτες είναι οι science direct, web of knowledge, google scholar και scopus.

Ανοιχτός κώδικας (open source)

Τα διαθέσιμα λογιστικά που είναι διαθέσιμα, τα οποία αναλύουν και επεξεργάζονται δεδομένα βιοακουστικών μετρήσεων, είναι τα εξής:

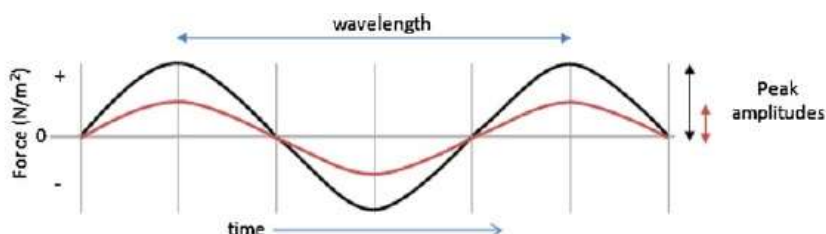
Arbimon 2, το Audacity, το Avisoft - SAS Lab Pro, το Avisoft – SAS Lab Lite, το Avisoft – Recorder, το BCID, το Luscinia, το Praat, το Raven, το Seawave and seapro, το Sonobat, το Sound Analysis Pro 2011, το Sound Ruler, το Syrinx – PC, το VAMP, το Song Scope, το Kaleidoscope, το bioacoustics, το monitor, το seewave, το Bat Scope 3, το Bat Explorer και το Bc Admin – bc Analyze – batident.

Από αυτά ελεύθερα στο διαδίκτυο είναι: *το Audacity, το Avisoft – SAS Lab Lite, το Luscinia, το Praat, το Sound Analysis Pro 2011, το Sound Ruler, το Syrinx – PC, το VAMP, το bioacoustics, το monitor, το seewave, το Bat Scope 3 και το Bat Explorer*

Τι είναι ήχος

Τα μικρόφωνα είναι τα παγκόσμια όργανα συλλογής δεδομένων της βιοακουστικής (Marler και Slabbekoorn 2004, Sueur et al., 2008b) και πιθανότατα θα αποτελέσουν το βασικό μέσο συλλογής δεδομένων για οικολόγους ηχοτοπίου (Qi et al., Pijanowski et al 2011a, b, Farina et al., 2011). Η τεχνολογία εγγραφής ήχου έχει προχωρήσει σημαντικά τα τελευταία χρόνια, κυρίως λόγω της εμπορικής επιτυχίας της τεχνολογίας ψηφιακού ήχου που καθιστά δυνατή την εγγραφή σε πολλαπλές τοποθεσίες και μακροπρόθεσμα (Brandes 2005), η οποία είναι πρωτοφανής. Ένας απλός ήχος που εκπέμπεται ως καθαρός τόνος (σχήμα 1) απεικονίζει τα χαρακτηριστικά ενός εξιδανικευμένου σήματος ημιτονοειδούς κύματος καθώς ταξιδεύει με την πάροδο του χρόνου. Το μήκος μεταξύ των κορυφών ενός κύματος είναι το μήκος κύματος (συνήθως ορίζεται ως λ), και το μέγεθος του κύματος το εύρος κορυφής. Η συχνότητα (f) του απλού ηχητικού κύματος, που μετράται ως ο αριθμός επαναλήψεων κυματομορφής ανά μονάδα χρόνου, συνήθως εκφράζεται ανά δευτερόλεπτο ή Hertz (Hz), προέρχεται από το μήκος κύματος και την ταχύτητα του ήχου (v) στο μέσο (αέρας = 343 m/s) ως $f = v / \lambda$.

Η ένταση εκφράζεται σε ντεσιμπέλ (ή dB) σε βάση 10 μονάδων (log), η οποία είναι μια βολική μορφή καθώς τα ανθρώπινα αυτιά μπορούν να διακρίνουν ένα δισεκατομμύριο πτυχές της έντασης του ήχου (Everest & Pholmann 2009). Η κλίμακα dB εκφράζεται σε σχέση με την αναφορά της έντασης, συνήθως αποδίδοντας μια τιμή 0 στο ελάχιστο που μπορεί να ακούσει ένας άνθρωπος. Μερικά παραδείγματα ήχων και τα αντίστοιχα επίπεδα dB που παράγουν είναι (Everest & Pholmann 2009): το θρόισμα των φύλλων (20 dB), η ανθρώπινη συνομιλία (60 dB), η έντονη κίνηση οδικής κυκλοφορίας (80 dB), το αεροπλάνο (160 dB) και η εκτόξευση πυραύλου (190 dB). Το πλάτος του ηχητικού κύματος μειώνεται με το τετράγωνο της απόστασης από την πηγή (σχήμα 2).



Σχήμα 2. Μια βασική αναπαράσταση ενός ηχητικού κύματος και των μετρήσεων που έγιναν για να το περιγράψουμε. Σε αυτό το παράδειγμα, υπάρχουν δύο κύματα που παρουσιάζονται από τις γραμμές διαφορετικού

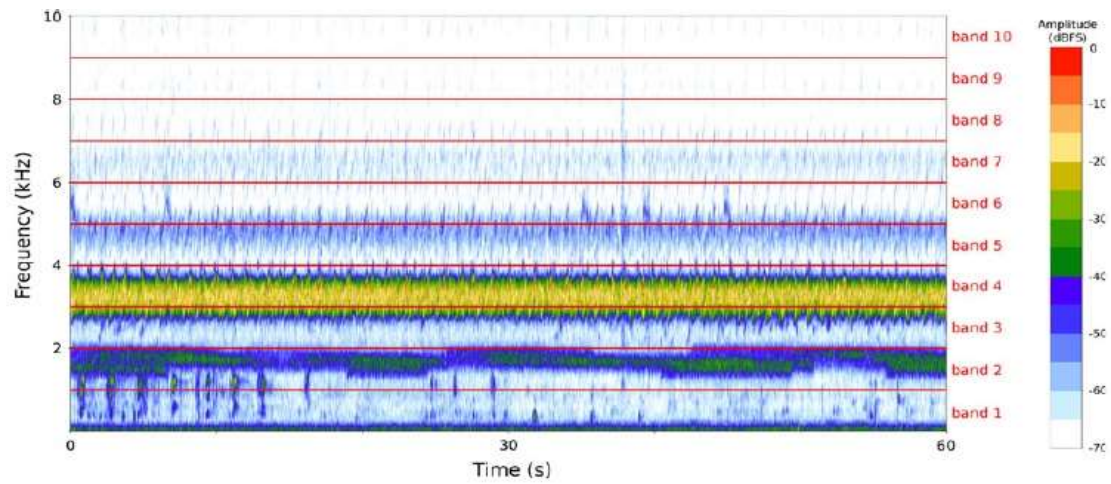
χρώματος. Και τα δύο κύματα έχουν το ίδιο μήκος κύματος αλλά διαφορετικό εύρος

Η εξασθένηση των ηχητικών κυμάτων εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του τοπίου (π.χ. κτίρια, δέντρα) καθώς και από τη συχνότητά τους. Τα ηχητικά κύματα σε υψηλότερες συχνότητες απορροφώνται περισσότερο από φύλλα και άλλες δομές, ενώ τα σήματα χαμηλής συχνότητας τείνουν να αποκλίνουν γύρω από τέτοια εμπόδια. Αυτό περιορίζει την απόσταση που μπορούν να μεταφέρουν τα σήματα υψηλότερης συχνότητας σε σχέση με τα σήματα χαμηλότερης συχνότητας. Τα πειράματα στα δάση έχουν οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι οι ήχοι χαμηλής συχνότητας εξασθενούν λιγότερο και επομένως μπορούν να ταξιδεύουν μακρύτερα (*Marten and Marler 1977, Marten et al., 1977*).

Μόλις ένα ηχητικό σήμα ταξιδεύει και παραλαμβάνεται, άλλοι παράγοντες μπορούν να καθορίσουν την ακρίβεια και την ερμηνεία του σήματος. Το τύμπανο στα ζώα πρέπει να είναι αρκετά ευαίσθητο για να ανιχνεύσει το σήμα από τις μικρές τυχαίες μεταβολές της πίεσης του μέσου. Ο αισθητήρας έχει μια σειρά ακουστικών συχνοτήτων που μπορεί να ανιχνεύσει, η οποία καθορίζεται από τη δομή του αυτιού και συνεπώς από την εξέλιξη του οργανισμού (*Greenfield 1994*). Παρόλο που ο εγκέφαλος είναι εξαιρετικά έμπειρος στο διαχωρισμό αλληλοεπικαλυπτόμενων σημάτων, πολλά ηχητικά σήματα μπορεί να παρεμβαίνουν περιστασιακά μεταξύ τους. Μόλις ανιχνευτεί ο ήχος, ο εγκέφαλος επεξεργάζεται τα ληφθέντα σήματα. Σε αυτό το στάδιο, ειδικά σήματα μπορούν να απορριφθούν υπέρ άλλων (*Henry & Lucas 2010*) ή μπορεί να πραγματοποιηθεί κάποια πρόσθετη επεξεργασία για την ερμηνεία του ηχητικού σήματος στα περιεχόμενα των πληροφοριών του (*Keller & Hahnloser 2009*). Για τους ανθρώπους, οι ηχητικές συχνότητες γίνονται αντιληπτές από το αυτί ως τον βαθμό της έντασης. Οι συχνότητες και ο βαθμός έντασης δεν είναι οι ίδιες, αλλά θεωρούνται ανάλογες (*Everest & Pholmann 2009*).

Στην πραγματικότητα, οι ήχοι σε ένα τοπίο είναι συχνά πολύπλοκοι. Πολλαπλές πηγές που βρίσκονται σε διαφορετικά σημεία του τοπίου εκπέμπουν ήχους σε διαφορετικούς χρόνους και εντάσεις (Εικ. 2). Εδώ, διάφορα αντικείμενα που παράγουν ήχους, ένας δρόμος, ένα πουλί και ένας χείμαρος, είναι διάσπαρτα σε όλο το τοπίο, δημιουργώντας πολλαπλούς ήχους σε διαφορετικές συχνότητες. Οι χρωματικές αποχρώσεις των ηχητικών κυμάτων αντιπροσωπεύουν την ένταση του ήχου σε αυτή την απόσταση με τους πιο σκούρο (δηλαδή πιο δυνατούς) ήχους πιο κοντά στην πηγή ήχου.

Σχήμα 3. Φασματογράφημα που δείχνει 10 ίσες διαχωρισμένες ζώνες συχνότητας. Η χορωδία των βατράχων στη μπάντα # 4 κυριαρχούν σε αυτήν την ηχογράφιση, όπως και οι φρύνοι στη μπάντα # 2. Οι αρμονικοί ήχοι που παράγονται από τη χορωδία των βατράχων εμφανίζονται στη μπάντα # 5 και στη συνέχεια στη μπάντα # 7



Εικόνα 2. Αναπαράσταση του ήχου με τρεις πηγές ήχου. Ανάλογα με την απόσταση από την οποία μπορεί να ανιχνευτεί κάθε ήχος, θα επηρεαστούν οι αισθητήρες που αντιπροσωπεύονται ως αριθμημένα μικρόφωνα

Χρησιμοποιώντας την ορολογία της οικολογίας του ηχοτοπίου, οι τρεις κύριες πηγές ήχου (βιοφωνία, γεωφωνία και ανθρωποφωνία) είναι παρούσες σε αυτό το ηχοτοπίο.

2. Ακουστικοί δείκτες βιοποικιλότητας

2.1. Δείκτες βιοποικιλότητας

Ένας δείκτης βιοποικιλότητας αποσκοπεί στην αξιολόγηση ορισμένων πτυχών της βιοποικιλότητας. Ως ακουστικός δείκτης μπορεί να οριστεί, το στατιστικό μέγεθος που συνοψίζει πτυχή της κατανομής της ακουστικής ενέργειας και άλλων πληροφοριών σε μια ηχογράφηση. Στην αξιολόγηση της βιοποικιλότητας, αναπτύχθηκαν πολυάριθμοι δείκτες για να περιγράψουν διάφορες πτυχές της ποικιλότητας των ζωικών και φυτικών κοινοτήτων. Αυτοί οι δείκτες αποσκοπούν στον ποσοτικό προσδιορισμό, μεταξύ άλλων, του πλούτου, της ομαλότητας, της απόκλισης ή της σπανιότητας των αφθονιών, των χαρακτηριστικών ή της φυλογένειας των ειδών [A. E. Magurran (2004), S. Pavoine, M. B. Bonsall (2011), A. E. Magurran, B. J. McGill (2011)]. Μια συνήθης διάκριση στην αξιολόγηση της βιοποικιλότητας γίνεται μεταξύ της ποικιλομορφίας εντός και μεταξύ των ομάδων, της ομάδας που αποτελεί μονάδα δειγματοληψίας ως χώρου, ενδιαίτηματος ή χρονικού συμβάντος. Η ποικιλομορφία εντός της ομάδας ονομάστηκε α ποικιλομορφία και η μεταξύ των ομάδων β ποικιλομορφία (R. H. Whittaker, 1972). Οι δείκτες που αναπτύχθηκαν για την αξιολόγηση της βιοποικιλότητας προσαρμόστηκαν πρόσφατα για την εκτίμηση της ηχητικής ποικιλομορφίας που προέρχεται από φυσικά περιβάλλοντα. Συνεπώς, η οντότητα που πρόκειται να αξιολογηθεί αποτελεί ακουστική κοινότητα ή ηχητικό υπόβαθρο. Η εκπομπή ήχου ζώων μπορεί να δειγματοληφτεί σε μια ομάδα, μια κοινότητα, ένα τοπίο ή σε διαφορετικές ομάδες ταυτόχρονα. Στη συνέχεια καθίσταται αναγκαία η εκτίμηση τόσο της ακουστικής ποικιλομορφίας εντός όσο και μεταξύ των ομάδων. Διάφοροι α ακουστικοί δείκτες έχουν αναπτυχθεί για να προσπαθήσουν να εκτιμήσουν τον πλούτο ή την πολυπλοκότητα μιας ακουστικής κοινότητας ή του ηχητικού σκηνικού και έχουν προταθεί β ακουστικοί δείκτες για την αξιολόγηση ενός επιπέδου ακουστικών ανισοτήτων μεταξύ των ακουστικών κοινοτήτων. Θα εξετάσουμε αυτές τις δύο οικογένειες των δεικτών διαδοχικά.

2.2. Δείκτες εντός ομάδας: α ακουστική πολυμορφία

Οι ακουστικοί δείκτες που εκτιμούν την ποικιλομορφία εντός της ομάδας μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες: (1) δείκτες που χρησιμοποιούν το εύρος ή την ένταση δηλαδή την ηχητική ενέργεια, (2) δείκτες που εκτιμούν ένα επίπεδο πολυπλοκότητας από πλευράς χρόνου, συχνότητας ή / και εύρους και (3) δείκτες που λαμβάνουν υπόψη τα τρία συστατικά (βιοφωνία, γεωφωνία και ανθρωποφωνία) ενός ήχου (Πίνακας I).

Πίνακας 1. Συνοπτική περιγραφή των δεικτών α και β ακουστικής ποικιλομορφίας

	Ακουστικοί δείκτες α	Συντομογραφία α	Αρχή
1	Σχετική αφθονία των πτηνών	-	Περιοχή του φάσματος σε σχέση με συγκεκριμένη τιμή έντασης
2	Φασματική εντροπία	Hf	Πολυπλοκότητα του φάσματος
3	Χρονική εντροπία	Ht	Πολυπλοκότητα του φακέλου
4	Δείκτης ακουστικής πολυπλοκότητας	ACI	Πολυπλοκότητα φάσματος
5	Δείκτης ακουστικής εντροπίας	H	Πολυπλοκότητα φακέλου & φάσματος
6	Αναλογία βιοφωνίας προς ανθρωποφωνία	ρ	Αναλογία βιοφωνίας προς ανθρωποφωνία
7	Βιοφωνία	B	Επίπεδο βιοφωνίας
8	Δείκτης ακουστικής ομοιότητας	AEI (= H)	Πολυπλοκότητα φακέλου & φάσματος
9	Δείκτης της Shannon	H'	Πολυπλοκότητα φάσματος
10	H κορυφή της βιοφωνίας	Biopeak	Επίπεδο βιοφωνίας
11	Διάμεσος φάκελος εύρους εγγραφής	M	Επίπεδο πλάτους της έντασης στον χρόνο
12	Δείκτης κανονικοποιημένης διαφοράς ηχοτοπίου	NDSI	Αναλογία ανθρωποφωνίας προς βιοφωνία
13	Παράμετροι στάθμης ήχου	L	Αναλογία της ηχητικής πίεσης σε σχέση με μία τιμή αναφοράς
14	Δείκτης ακουστικής ποικιλότητας	ADI(=H')	Πολυπλοκότητα του φάσματος
15	Ακουστικός πλούτος	AR	Πολυπλοκότητα & ένταση του φακέλου
16	Αριθμός κορυφών	NP	Πολυπλοκότητα φάσματος
17	Ενδιάμεση δραστηριότητα	-	Κλάσμα του φάσματος πάνω από ένα όριο εύρους
18	Εντροπία της φασματικής διακύμανσης	Hv	Πολυπλοκότητα του φάσματος
19	Εντροπία των φασματικών μέγιστων	Hm	Σύνθεση φάσματος
20	Φασματική παραμονή	-	Διάρκεια επαναλαμβανόμενων συμπλεγμάτων
21	Φασματική ποικιλότητα	-	Αριθμός ομάδων

	Ακουστικοί δείκτες β	Συντομογραφία	Αρχή
1	Φασματική ανομοιομορφία	<i>Df</i>	Ανομοιομορφία φάσματος
2	Χρονική ανομοιομορφία	<i>Dt</i>	Ανομοιομορφία φακέλου
3	Δείκτης ακουστικής ανομοιομορφίας	<i>D</i>	Ανομοιομορφία φακέλου & φάσματος
4	Απόσταση Kullback-Leible	<i>KL</i>	Ανομοιομορφία φάσματος
5	Απόσταση Kolmogorov-Smirnov	<i>KS</i>	Ανομοιομορφία φάσματος
6	Αθροιστική ανομοιομορφία	<i>Dcf</i>	Ομοιομορφία φάσματος
7	Διάνυσμα του συντελεστή συσχέτισης	<i>Rv</i>	Ομοιομορφία φάσματος

2.3. Δείκτες έντασης

Ένα απλό μέτρο μιας ακουστικής κοινότητας ή ενός ακουστικού τοπίου συνίσταται στη μέτρηση της έντασης ήχου. Σχεδόν όλες οι μετρήσεις είναι οι παράμετροι ήχου *L* που εκφράζονται σε deciBel με διαφορετική στάθμιση συχνότητας και χρονικό μέσο όρο οδηγώντας σε πληθώρα δεικτών (π.χ. *LCpeak LA, eq, Lday, Levening*) (*M. Rychtáriková, G. Vermeir, 2013*). Αυτές οι μετρήσεις χρησιμοποιούνται παραδοσιακά για την εκτίμηση της στάθμης θορύβου στο αστικό ηχητικό τοπίο (*A. J. Torija, D. P. Ruiz, A. Ramos-Ridao, 2011*) και περιστασιακά σε ένα οικολογικό ή σε ένα περιβάλλον διατήρησης (*J. R. Barber, K. R. Crooks, K. M. Fristrup, 2009, C. Francis, J. Paritsis, C. Ortega, A. Cruz, 2011, J. A. González-Oreja, A. A. De La Fuente-Díaz-Ordaz, L. Hernández-Santín, C. Bonache-Regidor, D. Buzo-Franco, 2012*). Ωστόσο, τα ακριβή μέτρα στάθμης ήχου απαιτούν τη χρήση πολλών και δαπανηρών μετρητών στάθμης ήχου και παραλείπουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τη συχνότητα και τα χρονικά μοτίβα των ήχων. Αυτά τα μέτρα θα πρέπει να συνοδεύονται από άλλους δείκτες που δουλεύουν στις διαστάσεις χρόνου και συχνότητας.

Δείκτης ακουστικής δραστηριότητας

Ο δείκτης ακουστικής δραστηριότητας ποσοτικοποιεί τη συμπεριφορά για να αυξήσει σημαντικά την ποσότητα των οικολογικών πληροφοριών που μπορούμε να εξαγάγουμε από ακουστικά σήματα και επειδή ο δείκτης μας

μετρά τη συμπεριφορά σε πληθυσμιακή κλίμακα, αυτή η μέθοδος μπορεί να είναι εξαιρετικά ισχυρή για τη διερεύνηση ερωτημάτων οικολογικής συμπεριφοράς μεγάλης κλίμακας. Οι μεταβολές στη συμπεριφορά τροφής των θηρευτών αποτελούν σημαντικούς δείκτες διαταραχής του περιβάλλοντος ή χαμηλότερων τροφικών επιπέδων που μπορεί να είναι δύσκολο να μετρηθούν ή να εκτιμηθούν άμεσα. Ο δείκτης ακουστικής δραστηριότητας μπορεί να είναι χρήσιμος για τη μέτρηση περιβαλλοντικών αλλαγών σε συστήματα με ακουστικά ενεργά είδη (*E. M. McDonald et al. 2016*).

Ακουστικός δείκτης επίπεδου ηχητικής πίεσης L (dB)

Η στάθμη ηχητικής πίεσης L έχει επιλεγεί ως ένα από τα μέτρα ομοιότητας λόγω της απλότητας και της γενικής χρήσης του στην ακουστική. Σε μια μελέτη (*Monika Rychtarikova, Gerrit Vermeir, 2011*) προτάθηκε μια μέθοδος ταξινόμησης που βασίζεται στην ταξινόμηση ηχητικών εγγραφών. Οι εγγραφές έγιναν σε αστικούς κοινόχρηστους χώρους, σε κατηγορίες που ορίζονται από ένα σύνολο ακουστικών παραμέτρων, που σχετίζονται με την ένταση του ήχου (που καθορίζεται από την στάθμη ηχητικής πίεσης), τις χρονικές μεταβολές του ήχου, που εκτιμώνται από την τραχύτητα και την ένταση διακύμανσης, το φάσμα συχνοτήτων, και την ευρυχωρία μέσω της λεγόμενης αστικής αλληλεπιδραστικής διαφοράς επιπέδων (*Rychtarikova M, Vermeir G, Domecka M., 2008*).

Ο κύριος στόχος αυτής της μελέτης είναι να δείξει σε ποιο βαθμό αυτές οι παράμετροι μπορούν να χρησιμεύσουν για την αναγνώριση ενός ήχου. Χρησιμοποιήθηκαν "αστάθμιστα" φάσματα καταγεγραμμένων τμημάτων καταγραφής θορύβου για τον υπολογισμό της στιγμιαίας στάθμης θορύβου και επιλέχθηκε μια "γρήγορη" χρονική σταθερά 125 ms για ηχητική στάθμη. Οι ακουστικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν ως μέτρα ομοιότητας για τη συγκέντρωση, σχετίζονται με (1) την ένταση ήχου που ορίζεται από την στάθμη ηχητικής πίεσης A-σταθμισμένης (Lp, A), (2) από τις χρονικές μεταβολές του ήχου που αξιολογούνται μέσω της τραχύτητας Roughness R και της διακύμανσης F, (3) από κάποιες πληροφορίες για το φάσμα συχνοτήτων που δίνεται μέσω του κέντρου βάρους του φάσματος συχνοτήτων που ορίζεται ως οξύτητα Sharpness S και (4) από τη χωρική ακουστική εντύπωση που περιγράφεται μέσω της λεγόμενης αστικής διαίρεσης επιπέδου διαστήματος uILD2.

Τα στατιστικά στοιχεία της εξέλιξης κάθε παραμέτρου σε ένα ηχητικό δείγμα (Lx, Rx, Sx και Fx) εκφράζονται από τις τιμές της παραμέτρου που έχουν ξεπεραστεί κατά τη διάρκεια ενός κλάσματος x% του χρόνου εγγραφής, με το κλάσμα να παίρνει τυπικά τιμές 5% (εξαιρετικά γεγονότα), 50% (πιθανή κατάσταση) και 95% (σχεδόν συνεχής κατάσταση). Ο υπολογισμός των τιμών των τεσσάρων ακουστικών παραμέτρων (Lp, A, R, F και S) στο χρονικό πεδίο πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό 01 dB Sonic® και ο προσδιορισμός των στατιστικών τους τιμών καθώς και ο υπολογισμός του uILD2 πραγματοποιήθηκε με το Matlab®.

Δύο πρόσφατες μελέτες χρησιμοποίησαν μετρήσεις πλάτους για να εκτιμήσουν την φυσική ένταση ήχου (*A. Rodriguez, A. Gasc, S. Pavoine, P. Grandcolas, P. Gaucher, J. Sueur, 2014, S. H. Gage, A. C. Axel, 2016*). Στη Γαλλική Γουιάνα, το ακουστικό πλάτος του ηχητικού αρχείου που παράγεται από 24 καταγραφείς εκτιμήθηκε υπολογίζοντας την ρίζα του τετραγώνου της απόλυτης τιμής των ακατέργαστων σημάτων (*A. Rodriguez, A. Gasc, S. Pavoine, P. Grandcolas, P. Gaucher, J. Sueur, 2014*). Αυτή η πληροφορία χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία για την κατάρτιση χαρτών με βάση το πλάτος της δασικής περιοχής που υποβλήθηκαν σε δειγματοληψία, αλλά ολοκληρώθηκε με μετρήσεις που βασίζονται στο περιεχόμενο συχνότητας του ηχοτοπίου.

Η ισχύς του ηχοτοπίου μετρήθηκε επίσης σε μια πρόσφατη μελέτη σε ένα δάσος φυλλοβόλων και κωνοφόρων δέντρων της Βορείου Αμερικής (*S. H. Gage, A. C. Axel, 2016*). Ωστόσο, αυτή δεν ήταν μια σταθερή μέτρηση, καθώς η ηχητική ισχύς μετρήθηκε επίσης για 11 διαστήματα συχνοτήτων λαμβάνοντας συνεπώς υπόψη τη διάσταση συχνοτήτων του ήχου (βλ. Ενότητα δείκτες Ηχοτοπίου). Τελικά, δοκιμάστηκε ένα σύνολο έξι μετρήσεων που σχετίζονται με πλάτος για να εκτιμηθεί ο πλούτος των πτηνών μιας περιοχής στην Αυστραλία (*M. Towsey, J. Wimmer, I. Williamson, P. Roe, 2014*).

2.4. Δείκτες πολυπλοκότητας

Η έννοια των "δεικτών πολυπλοκότητας" βασίζεται στην υπόθεση ότι η ακουστική παραγωγή μιας κοινότητας ή ενός τοπίου θα αυξηθεί σε πολυπλοκότητα με τον αριθμό των ατόμων και των ειδών που τραγουδούν. Ένας δείκτης που συλλαμβάνει την ετερογένεια του ήχου πρέπει στη συνέχεια να δώσει μια εικόνα της ακουστικής δραστηριότητας των ζώων. Οι ακουστικοί δείκτες βιοποικιλότητας λειτουργούν ως «εκπρόσωποι» των κλασικών δεικτών βιοποικιλότητας. Στην περίπτωση των κλασικών δεικτών οι μετρήσεις γίνονται με την καταμέτρηση ή την αιχμαλωσία των πτηνών, ενώ με τους ακουστικούς δείκτες δεν υπάρχει λόγος για κάτι τέτοιο. Οι ακουστικοί δείκτες θα δώσουν ένα αποτέλεσμα που θα συσχετίζεται άμεσα με τους κλασικούς δείκτες, αλλά με έναν μη επεμβατικό τρόπο. Ο πρώτος ακουστικός δείκτης που αναπτύχθηκε σε μια τοπική κοινότητα και τοπίο ήταν ένας δείκτης που αξιολογεί τη σχετική αφθονία και τη σύνθεση των κοινοτήτων πουλιών (*N. T. Boelman, G. P. Asner, P. J. Hart, R. E. Martin, 2007*). Αυτός ο δείκτης υπολογίζει την περιοχή εντός του φάσματος συχνοτήτων πάνω από μια συγκεκριμένη τιμή έντασης dB και εντός συγκεκριμένης περιοχής συχνοτήτων. Αυτή η μέτρηση, η οποία είναι συνάρτηση τόσο του ηχητικού επιπέδου όσο και του αριθμού των ζωνών συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται από την κοινότητα των πτηνών, διευκόλυνε την παρακολούθηση ειδών σε ολόκληρα

οικοσυστήματα των υποθαλάσσιων πτηνών της Χαβάης (N. T. Boelman, G. P. Asner, P. J. Hart, R. E. Martin, 2007).

Ακουστικός δείκτης Shannon (H')

Μετά τον πλούτο των ειδών (αριθμός ειδών), ο δείκτης Shannon που προτάθηκε από τους Claude Shannon και Warren Weaver το 1949 είναι ο δεύτερος πλέον χρησιμοποιούμενος δείκτης της ποικιλομορφίας στην οικολογία (Buddle CM, Beguin J, Bolduc E, Mercado A, Sackett TE, et al. 2005). Ο δείκτης Shannon είναι ένας κλασικός δείκτης ποικιλότητας και είναι βασισμένος στη θεωρία των πληροφοριών και όχι σε πρακτικές εφαρμογές οικολογίας (Krebs, 1999). Σύμφωνα με τη θεωρία των πληροφοριών, το οικοσύστημα λειτουργεί ως δίαυλος επικοινωνίας και τα στοιχεία που το απαρτίζουν ως μεταφορείς της πληροφορίας. Οι δείκτες ποικιλότητας αποτελούν μια πρακτική εφαρμογή αυτής της αντίληψης στα οικοσυστήματα και αποτελούν μέτρο της δομής και της ετερογένειας των ακουστικών κοινοτήτων. Οι πληροφορίες που λαμβάνονται για μια ακουστική κοινότητα είναι οι εξής: ο αριθμός των ειδών, ο αριθμός των ατόμων από κάθε είδος, οι περιοχές που καταλαμβάνουν τα άτομα από κάθε είδος και οι περιοχές που καταλαμβάνουν τα άτομα σαν ξεχωριστά άτομα. Ο δείκτης Shannon υποθέτει ότι ένα άτομο επιλέγεται τυχαία από μία απείρως μεγάλη ακουστική κοινότητα (Pielou, 1975) και ότι όλα τα είδη αντιπροσωπεύονται στο δείγμα. Έτσι μετράει το βαθμό “αβεβαιότητας” στην πρόβλεψη του είδους (Καρανδεινός, 2007).

Σε γενικές γραμμές, είναι μετρήσιμος σε ένα σύνολο κατηγοριών που διαφέρουν στις συχνότητες. Αυξάνει με την ομαλότητα των συχνοτήτων των κατηγοριών και με τον αριθμό των κατηγοριών. Συχνά στην οικολογία, οι κατηγορίες είναι είδη που διαφέρουν από τις σχετικές τους αφθονίες σε μια κοινότητα. Εδώ το εφαρμόζουμε σε μια σειρά χρονοσειρών μεγέθους n , οι κατηγορίες είναι οι μονάδες χρόνου και οι συχνότητες τους είναι η συνάρτηση μάζας πιθανότητας του περιγράμματος πλάτους. Η επικράτηση του δείκτη Shannon έναντι άλλων δεικτών, ιδίως έναντι του δείκτη Simpson, έχει μακρά ιστορία συζητήσεων (Magurran AE 2004). Το βασικό χαρακτηριστικό του είναι ότι είναι πιο ευαίσθητος στις σπάνιες κατηγορίες (Hill MO 1973). Κατ' επέκταση, με τη χρήση αυτού του δείκτη, οι μονάδες χρόνου με χαμηλή συνάρτηση μάζας πιθανότητας του φάσματος πλάτους εξακολουθούν να επηρεάζουν την αξία της ακουστικής ποικιλομορφίας. Η μέγιστη τιμή του δείκτη Shannon εξαρτάται από τον αριθμό των κατηγοριών ($\log_2(n)$). Οι ήχοι των ζώων στο πεδίο θα επηρεάσουν τον φάκελο του πλάτους σε κάθε μονάδα χρόνου. Ωστόσο, ο αριθμός των μονάδων χρόνου καθορίζεται από τη μεθοδολογία. Επομένως, για να αποκτήσουμε ένα δείκτη που επηρεάζεται μόνο από τους ήχους των ζώων στο πεδίο, διαιρούμε τον δείκτη Shannon κατά το μέγιστο του. Ο δείκτης που προκύπτει μετρά την ομαλότητα του φακέλου πλάτους στις μονάδες χρόνου.

Επιτρέποντας κάθε ζώνη να αντιπροσωπεύει ένα συγκεκριμένο είδος, η πληρότητα (δηλ. Η αναλογία αυτής της ζώνης με ήχο) κάθε ζώνης συχνοτήτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του δείκτη Shannon για μια εγγραφή ως:

$$H' = \sum_{i=1}^s p_i \cdot \ln \cdot p_i$$

όπου p_i είναι το κλάσμα του ήχου σε κάθε μία i ζώνη συχνοτήτων στον s αριθμό των ζωνών συχνοτήτων.

Δείκτης Ποικιλότητας του Simpson (D)

Ένας ακόμα κλασικός δείκτης ποικιλότητας, που δίνει βαρύτητα στις αφθονίες των πιο κοινών ειδών και συνήθως αναφέρεται ως μέτρο κυριαρχίας ή μέτρο ισομέρειας. Η κυριαρχία και η ισομέρεια είναι μεν έννοιες αντίθετες, αποτελούν δε, τις δύο όψεις του ίδιου νομίσματος. Μία από τις γνωστότερες και παλαιότερες μεθόδους μέτρησης της κυριαρχίας είναι ο δείκτης του Simpson ο οποίος περιέγραψε την πιθανότητα δυο άτομα που συλλέγονται τυχαία από ένα δείγμα μιας απείρωσ μεγάλης βιοκοινότητας να ανήκουν στο ίδιο είδος ως (Magurran, 2004)

$$D = \sum_{i=1}^S p_i^2$$

όπου p_i είναι η πιθανότητα ένα τυχαίο άτομο της βιοκοινότητας με S είδη να ανήκουν στο είδος i & S είναι ο αριθμός των ειδών. Η πιθανότητα αυτή είναι αντιστρόφως ανάλογη με τον αριθμό των ειδών, όσο λιγότερα είδη έχουμε στη βιοκοινότητα, τόσο η πιθανότητα αυτή αυξάνεται. Επίσης, όσο περισσότερο ανισομερής είναι η κατανομή των ατόμων στα είδη, τόσο η πιθανότητα αυξάνεται για το είδος με τα περισσότερα άτομα. Η πιθανότητα είναι ίση με τη μονάδα μόνο στην περίπτωση που υπάρχει ένα μόνο είδος. Ο δείκτης του Simpson ποσοτικοποιεί την ιδιότητα της κυριαρχίας και επηρεάζεται από τον αριθμό των ειδών αλλά και από την κατανομή των ατόμων στα είδη (Καρανδεινός, 2007). Όσο ο δείκτης D αυξάνεται, η ποικιλότητα μειώνεται εφόσον είναι αντίθετη της κυριαρχίας. Για αυτόν τον λόγο ο δείκτης συνήθως εκφράζεται ως $1 - D$ ή $1 / D$. Σε αυτήν την περίπτωση το $1 - D$ εκφράζει την πιθανότητα δύο άτομα που επιλέγονται τυχαία να ανήκουν σε διαφορετικά είδη. Επιπλέον, όσο μεγαλύτερη είναι η ισομέρεια της κατανομής των ατόμων στα είδη, τόσο η πιθανότητα αυτή αυξάνεται. Οι τιμές του δείκτη $1 - D$ κυμαίνονται από 0 (χαμηλή ποικιλότητα) μέχρι σχεδόν 1 (υψηλή ποικιλότητα), ενώ για τον αντίστροφο δείκτη $1 / D$ από 1 έως S . Ο δείκτης του Simpson δίνει μεγάλη βαρύτητα στα άφθονα είδη σε ένα δείγμα, ενώ είναι λιγότερο ευαίσθητος ως προς τον αριθμό των ειδών. Όταν ο αριθμός των ειδών υπερβαίνει το 10, τότε η τιμή του δείκτη καθορίζεται από την κατανομή της αφθονίας των ειδών (May, 1975). Ο δείκτης του Simpson είναι ένας από τους πιο σημαντικούς και αξιόπιστους δείκτες ποικιλότητας που υπάρχουν. Στην ουσία εκφράζει την διακύμανση στην κατανομή της αφθονίας των ειδών (Magurran, 2004).

Δείκτης της σχετικής αφθονίας των πτηνών

Ο πρώτος ακουστικός δείκτης που αναπτύχθηκε σε μια τοπική κοινότητα και τοπίο ήταν ένας δείκτης που αξιολογεί τη σχετική αφθονία και τη σύνθεση των κοινοτήτων πουλιών (N. T. Boelman, G. P. Asner, P. J. Hart, R. E. Martin, 2007). Αυτός ο δείκτης υπολογίζει την περιοχή εντός του φάσματος συχνοτήτων πάνω από μια συγκεκριμένη τιμή έντασης dB και εντός συγκεκριμένης περιοχής συχνοτήτων. Αυτή η μέτρηση, η οποία είναι συνάρτηση τόσο του ηχητικού επιπέδου όσο και του αριθμού των ζωνών συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται από την κοινότητα των πτηνών, διευκόλυνε την παρακολούθηση ειδών σε ολόκληρα οικοσυστήματα των πτηνών της Χαβάης (N. T. Boelman, G. P. Asner, P. J. Hart, R. E. Martin, 2007). Αυτός ο δείκτης προτάθηκε στο πλαίσιο μιας μελέτης που έγινε στο Εθνικό Πάρκο Ηφαιστειών της Χαβάης (HAVO). Σκοπός αυτής της μελέτης ήταν να γίνει αντιληπτό πώς η δομή και η αφθονία των ιθαγενών και εξωτικών φυτών συσχετίζονταν με τη σχετική αφθονία των ιθαγενών και εξωτικών ειδών πουλιών. Χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό άμεσων δειγματοληπτικών ερευνών, βιοακουστικής και εναέριας τηλεπισκόπησης, αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα της εισβολής φυτών και της διακύμανσης της δομής του οικοσυστήματος στην αφθονία των πτηνών και τη σύνθεση της κοινότητας. Από αυτές τις ψηφιακές εγγραφές υπολογίστηκε ένας βιοακουστικός δείκτης σχετικά με την αφθονία των πτηνών για κάθε τοποθεσία και έγινε σύγκριση των φασμάτων εύρους συχνοτήτων για να ανιχνευτούν διαφορές στη σύνθεση της κοινότητας των πτηνών μεταξύ των τοποθεσιών. Αυτές οι βιοακουστικές μετρήσεις επικυρώθηκαν με παραδοσιακές ορνιθολογικές έρευνες που μετρούσαν άμεσα την αφθονία των πτηνών και τη σύνθεση των ειδών.

Δείκτης ακουστικής εντροπίας (H)

Οι Sueur et al. (2008b) ανέπτυξαν για πρώτη φορά έναν δείκτη ακουστικής εντροπίας (H) α ποικιλομορφίας αποτελούμενο από δύο υποδείκτες: **τον δείκτη χρονικής εντροπίας H_t** και **τον δείκτη φασματικής εντροπίας H_f** σύμφωνα με την $H = H_t \times H_f$ με $0 \leq H \leq 1$. H_t και H_f υπολογίζονται ως εξής:

$$H_t = - \sum_{t=1}^n * \log_2(A(t)) * \log_2(n)^{-1}$$

&

$$H_f = - \sum_{f=1}^n * \log_2(S(f)) * \log_2(n)^{-1}$$

όπου n = μήκος του σήματος σε αριθμό ψηφιοποιημένων σημείων, A (t) = συνάρτηση μάζας πιθανότητας του φάσματος πλάτους, S (f) = συνάρτηση

μάζας πιθανότητας του μέσου φάσματος που υπολογίζεται με τη χρήση του βραχυπρόθεσμου μετασχηματισμού Fourier (STFT) καθώς επίσης και με το σήμα ενός μη επικαλυπτόμενου παράθυρου Hanning $N = 512$ σημείων. Η φασματική εντροπία, H_f , ελήφθη εφαρμόζοντας την ομαλότητα Shannon στο μέσο φάσμα συχνοτήτων που κλιμακώνεται από το σύμπλεγμα του με είδη που αντικαθίστανται από αποθήκες συχνότητας. Ομοίως, η χρονική εντροπία, H_t υπολογίστηκε επί του εύρους φάσματος που αποκτήθηκε με το μετασχηματισμό Hilbert του σήματος, κλιμακωμένο από το ολοκλήρωμά του επίσης. Ο δείκτης εντροπίας H υπολογίζεται ως το προϊόν τόσο των χρονικών όσο και των φασματικών εντροπιών ($H = H_t \times H_f$ με $H \in [0,1]$). Ο H θα τείνει προς το 0 για ένα μόνο καθαρό τόνο, αυξάνεται με τον αριθμό των ζωνών συχνοτήτων και των διαμορφώσεων πλάτους και τείνει προς 1 για τυχαίο θόρυβο.

Ακουστικός δείκτης διάμεσος του εύρους της έντασης στον χρόνο (M)

Οι Depraetere et al., 2012 εισήγαγαν τη διάμεσο του μέσου φάσματος πλάτους M . Το συνολικό εύρος του σήματος, το οποίο δεν ελήφθη υπόψη στον δείκτη H , εξετάστηκε εδώ για πρώτη φορά, οδηγώντας σε ένα νέο ακουστικό δείκτη που ακολουθεί:

$$M = \text{median}(A(t)) \times 2^{(1-\text{depth})}$$

με $0 \leq M \leq 1$, όπου $A(t)$ = φάκελος πλάτους και depth = βάθος ψηφιοποίησης σήματος.

Μια ελαφρά τροποποίηση του δείκτη φασματικής εντροπίας H_f εισήχθη αργότερα μειώνοντας την ανάλυση συχνότητας των μέσων φασμάτων σε 1 kHz ή εφαρμόζοντας τη ποικιλότητα Shannon (= ομοιότητα Shannon / \ln αριθμός συχνοτήτων) (*W. Joo, S. H. Gage, E. P. Kasten, 2011*) και αυτός είναι ο ακουστικός δείκτης ακουστικής ποικιλότητας ADI.

Δείκτης ακουστικής ποικιλότητας (ADI)

Οι Villanueva-Rivera et al. (2011) ανέπτυξαν τον δείκτη ακουστικής ποικιλότητας (ADI), ο οποίος παρόμοια με τον δείκτη ακουστικής εντροπίας χρησιμοποιεί τον δείκτη Shannon-Weiner για την εκτίμηση της ακουστικής πολυπλοκότητας. Ο ADI διαιρεί τα φασματογραφήματα σε πολλαπλές ζώνες συχνοτήτων και υπολογίζει την ποικιλομορφία στις αναλογίες κάθε ζώνης που καταλαμβάνεται από ήχους πάνω από ένα ορισμένο κατώτατο εύρος.

Δείκτης ακουστικής Ομοιότητας (AEI)

Οι ίδιες πληροφορίες χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του δείκτη ακουστικής ομοιότητας (AEI), που αναπτύχθηκε επίσης από τους Villanueva-Rivera et al. (2011), ο οποίος μετράται χρησιμοποιώντας το συντελεστή Gini και ως εκ τούτου έχει αρνητική σχέση με τον ADI (*Villanueva-Rivera et al., 2011*). Ο συντελεστής Gini (*C. Gini, 1912*) εφαρμόστηκε σε ένα φάσμα συχνοτήτων πάνω από ένα προκαθορισμένο όριο εύρους που οδηγεί στον δείκτη ακουστικής ομοιότητας (AEI) (*L. Villanueva-Rivera, B. Pijanowski, J.*

Doucette, B. Pekin, 2011). Αργότερα φαίνεται ότι η εντροπία, και ειδικότερα το φασματικό συστατικό της H_f , θα μπορούσε να δώσει αντίθετα-δισαιθητικά αποτελέσματα όταν εφαρμόζεται σε ηχογραφήσεις όπου ο θόρυβος του περιβάλλοντος κυριαρχεί πάνω από την παραγωγή ήχου ζώων, όπως συμβαίνει συχνά σε εύκρατα ενδιαιτήματα, όπου η ποικιλομορφία είναι χαμηλότερη από ότι στα τροπικά δάση. Αυτό προκάλεσε το σχεδιασμό ενός άλλου δείκτη, που ονομάζεται Ακουστικός Πλούτος (AR), που συνδυάζει την χρονική εντροπία και το πλάτος αλλά όχι τη φασματική εντροπία.

Ακουστικός Πλούτος (AR)

Ο τοπικός θόρυβος περιβάλλοντος μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα αποτελέσματα που παρέχει ο δείκτης H . Αυτό μπορεί να προκαλέσει μεροληψία στον ακουστικό δείκτη H_f , δημιουργώντας ψευδείς υψηλές τιμές όταν ο άνεμος και η βροχή κυριαρχούν πάνω από τις κλήσεις των ζώων, ιδιαίτερα σε εύκρατα ενδιαιτήματα, όπου η ποικιλομορφία είναι χαμηλότερη από ότι στα τροπικά δάση. Αυτό μας οδηγεί στην ανάπτυξη ενός νέου δείκτη α , που ονομάζεται Ακουστικός Πλούτος (AR), που εισήχθη από τους Depraetere et al., 2012 με βάση την χρονική εντροπία και πλάτος του σήματος και όχι τη φασματική εντροπία. Και συσχετίζεται με τον πλούτο των ειδών των πτηνών, ακολουθώντας:

$$AR = \frac{(\text{rank}(Ht) * \text{rank}(M))}{n^2}, \text{ με } 0 \leq AR \leq 1$$

Δείκτης ακουστικής πολυπλοκότητας (ACI)

Το ίδιο έτος (2011) οι Pieretti et al. προτείνουν τον δείκτη ακουστικής πολυπλοκότητας (ACI), ο οποίος εκτιμά την ποικιλομορφία μιας ακουστικής κοινότητας μετρώντας τις διακυμάνσεις των εντάσεων μέσα σε μια ηχογράφηση, με βάση την υπόθεση ότι οι ήχοι των ζώων, αντίθετα από τους ανθρωπογενείς θορύβους, συνήθως διαφέρουν σημαντικά στην ένταση ήχου. Ο δείκτης διαιρεί τις εγγραφές σε διαστήματα πολλαπλών συχνοτήτων και σε χρονικά υποσύνολα και υπολογίζει τις διαφορές στις εντάσεις παρακείμενων ήχων, με την τελική τιμή ACI να είναι το τελικό σύνολο αυτών των διαφορών. Ο δείκτης δοκιμάστηκε σε εθνικό πάρκο της βόρειας Ιταλίας και βρέθηκε να συσχετίζεται με τον αριθμό των κλήσεων των πουλιών. Η υπόθεση στην οποία βασίζεται ο τύπος ACI βασίζεται στην παρατήρηση ότι πολλοί βιοτικοί ήχοι, όπως τα τραγούδια πουλιών, χαρακτηρίζονται από μια εγγενή μεταβλητότητα των εντάσεων, ενώ ορισμένοι τύποι ανθρώπινου θορύβου (όπως το πέραςμα του αυτοκινήτου ή η διέλευση αεροπλάνου) παρουσιάζουν σταθερές τιμές έντασης. Συνεπώς, ο μακροπρόθεσμος στόχος του ACI είναι να αναπτύξει μια διαδικασία ακουστικής εκχύλισης πληροφοριών του φυσικού ήχου, που αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για τον προσδιορισμό των αλλαγών στη συμπεριφορά και τη σύνθεση μιας κοινότητας φωνητικής επικοινωνίας και,

κατά συνέπεια, για την καλύτερη παρακολούθηση της δυναμικής των ζώων με γρήγορο τρόπο. Ο ACI λειτουργεί στο μωσαϊκό (matrix) που επιστρέφεται από ένα βραχυπρόθεσμο μετασχηματισμό Fourier (STFT) που εφαρμόζεται στην πλήρη καταγραφή ή σε μια σειρά διαδοχικών παραθύρων και μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με έναν τύπο που περιλαμβάνει μόνο λίγα βήματα (σχήμα 4) . Με βάση το μωσαϊκό (matrix) των εντάσεων που εξάγονται από το φασματογράφημα ((διαιρούμενο σε χρονικά βήματα και σε διαστήματα (intervals) μεταξύ σημείων στο συνολικό εύρος των συχνοτήτων της ηχογράφησης), ο ACI υπολογίζει την απόλυτη διαφορά (dk) μεταξύ δύο γειτονικών τιμών έντασης (I_k και $I(k+1)$) σε ένα διάστημα μοναδικής συχνότητας (Δfl):

$$d(k) = | I_k - I(k+1) |$$

και στη συνέχεια προσθέτει μαζί όλες τις dk που περιλαμβάνονται στο πρώτο χρονικό βήμα της εγγραφής:

$$D = \sum_{k=1}^n dk, \text{ όπου } j = \sum_{k=1}^n \Delta tk \text{ και } n = \text{ο αριθμός των } \Delta tk \text{ στο } j$$

όπου D είναι το άθροισμα όλων των dk που περιέχονται στο j . Προκειμένου να επιτευχθεί η σχετική ένταση και να μειωθεί η επίδραση της απόστασης των πτηνών από το μικρόφωνο εγγραφής, αυτό το αποτέλεσμα διαιρείται στη συνέχεια με το συνολικό άθροισμα των τιμών έντασης που καταγράφονται στο j :

$$ACI = \frac{D}{\sum_{k=1}^n I_k}$$

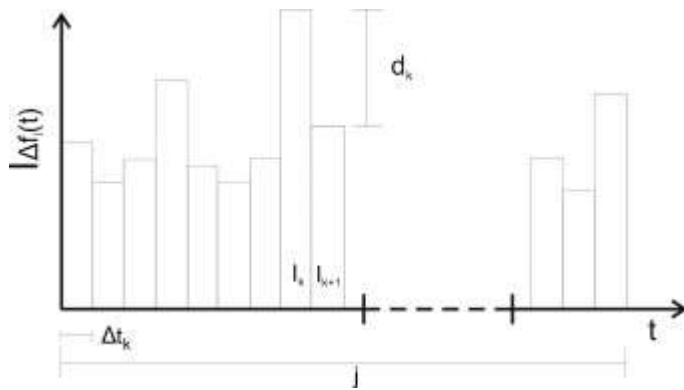
όπου ο ACI υπολογίζεται σε ένα μόνο χρονικό βήμα (j) και σε ένα μόνο διάστημα συχνότητας (Δfl). Στη συνέχεια, ο ACI, ο οποίος επεξεργάστηκε σε όλες τις χρονικές ενέργειες που περιλαμβάνονται στην καταγραφή, υπολογίζεται:

$$ACI(\Delta fl) = \sum_{j=1}^m ACI, \text{ όπου } m = \text{ο αριθμός της } j \text{ καταγραφής όπου ο ACI } (\Delta fl) \text{ αντιστοιχεί στον ACI ενός ολόκληρου κάδου συχνότητας.}$$

Τέλος, ο συνολικός ACI για όλους τους κάδους συχνότητας υπολογίζεται:

$$ACI_{tot} = \sum_{l=1}^q ACI(\Delta fl), \text{ όπου } \Delta f = \sum_{l=1}^q \Delta fl, \text{ όπου } q = \text{ο αριθμός του } \Delta fl$$

όπου το ACI (tot) είναι η συνολική τιμή του δείκτη για ολόκληρη την εγγραφή.



Σχήμα 4. Επεξηγηματικό γράφημα του Δείκτη Ακουστικής Πολυπλοκότητας (t : χρόνος, Δt_k : ένα μόνο χρονικό κλάσμα, Δf : ένας κάδος συχνότητας, $|\Delta f(t)|$: ένταση καταχωρημένη σε κάδο συχνότητας Δf)

Δείκτης αριθμός κορυφώσεων (NP)

Για την αξιολόγηση της ακουστικής πολυπλοκότητας αναπτύχθηκε ένας επιπλέον δείκτης. Αυτός ο δείκτης, ονομάζεται NP (Number Peaks) "Αριθμός κορυφών" και προτάθηκε από τους Gasc et al., 2013b. Αυτός ο δείκτης μετρά τον αριθμό των κύριων κορυφώσεων συχνότητας που λαμβάνονται σε ένα μέσο φάσμα που έχει κλιμακωθεί μεταξύ 0 και 1. Αυτός ο δείκτης προκύπτει από την υπόθεση ότι η φασματική πολυπλοκότητα ενός ήχου μπορεί να εκτιμηθεί με τον αριθμό των ζωνών συχνοτήτων που καταλαμβάνονται. Αναμένεται πράγματι ότι ένας ήχος που παράγεται από τα είδη $n + k$ θα πρέπει να περιέχει υψηλότερες κορυφές συχνότητας από έναν ήχο που οφείλεται μόνο σε είδη n . Ο δείκτης NP θεωρείται επίσης ότι δεν είναι ευαίσθητος στον θόρυβο που δεν ταιριάζει απόλυτα με τον ήχο που μας ενδιαφέρει καθώς οι κορυφές υπολειπόμενης συχνότητας λόγω του ήχου υποβάθρου μπορούν εύκολα να απορριφθούν. Ωστόσο, κάποια μεροληψία μπορεί να εμφανιστεί από ένα είδος που παράγει θόρυβο σαν τον ήχο των τζιτζικιών, που μπορεί να επιστρέψει ένα υψηλότερο NP από πολλά είδη που παράγουν ήχο καθαρού τόνου. Αυτή η προκατάληψη μπορεί επίσης να επηρεάσει άλλους δείκτες.

Ο δείκτης εφαρμόστηκε σε μια μελέτη που έγινε στη Νέα Καληδονία στον Ειρηνικό. Ένα μέσο φάσμα αποκτήθηκε για κάθε αρχείο ήχου με υπολογισμό του Σύντομου μετασχηματισμού Fourier "short-time Fourier transform" (STFT, μη επικαλυπτόμενο μέγεθος παραθύρου = 512 δείγματα = 11 ms). Μια συγκεκριμένη λειτουργία αναπτύχθηκε μέσα στο πακέτο "seewave" (Sueur J, Aubin T, Simonis C, 2008) του περιβάλλοντος R (R Development Core Team R, 2010) για την επεξεργασία της αυτόματης ανίχνευσης των φασματικών κορυφών συχνότητας κάθε μέσου φάσματος. Όλες οι κορυφές του φάσματος ανιχνεύθηκαν πρώτα και στη συνέχεια επιλέχθηκαν χρησιμοποιώντας κατώτατα όρια πλάτους και συχνότητας. Ο πρώτος παράγοντας επιλογής βασίστηκε στις κλίσεις πλάτους κάθε κορυφής. Μόνο οι

κορυφές με κλίσεις υψηλότερες από 0.01 διατηρήθηκαν. Ο δεύτερος παράγοντας επιλογής βασίστηκε στη συχνότητα. Στις περιπτώσεις όπου οι διαδοχικές κορυφές ήταν μικρότερες από 200 Hz μεταξύ τους, διατηρήθηκε μόνο η υψηλότερη κορυφή σε πλάτος. Το NP ορίστηκε απλώς ως ο αριθμός κορυφών μετά την ανίχνευση και την επιλογή των κορυφών.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τέσσερις ακουστικοί δείκτες (*φασματική ποικιλότητα, εντροπία των φασματικών μέγιστων, εντροπία της φασματικής διακύμανσης και η φασματική παραμονή*) που υπολογίζονται σε ανάλυση ενός λεπτού για τη διάρκεια μιας εγγραφής 24 ωρών. Γίνεται κατάταξη των τμημάτων ενός λεπτού μιας καταγραφής 24 ωρών κατά φθίνουσα σειρά σύμφωνα με μια βαθμολογία "ακουστικού πλούτου" που προέρχεται από ένα μόνο δείκτη ή έναν σταθμισμένο συνδυασμό δύο ή περισσότερων. Περιγράφονται συνδυασμοί δεικτών οι οποίοι οδηγούν σε αποτελεσματικότερες εκτιμήσεις του πλούτου των ειδών σε σχέση με την τυχαία δειγματοληψία από την ίδια τη καταγραφή, όπου η αποτελεσματικότητα ορίζεται ως το σύνολο των ειδών που προσδιορίστηκαν για τη δεδομένη προσπάθεια ακρόασης ενός λεπτού ηχητικών τμημάτων από ένα άτομο με εξειδίκευση στην ταυτοποίηση των πτηνών, σε μια σειρά ταξινομημένη με δείκτες που περιγράφουν το ακουστικό περιεχόμενο των τμημάτων. Η προσπάθεια επιτυγχάνεται εάν επιτευχθεί μια αποτελεσματικότερη εκτίμηση του πλούτου των ειδών πτηνών (αριθμός ειδών που προσδιορίστηκαν για μια δεδομένη προσπάθεια ακρόασης) από τη χρήση παραδοσιακών επιτόπιων μετρήσεων ή τυχαίας δειγματοληψίας από τις ηχογραφήσεις. Εφαρμόζονται συνδυασμοί ακουστικών δεικτών σε δύο ζητήματα: 1. την αποτελεσματική εκτίμηση του πλούτου των ειδών πτηνών και 2. την ανίχνευση κοινών ακουστικών "καθεστώτων" στις ηχογραφήσεις σε ημιτροπικές περιοχές της Αυστραλίας, δηλαδή τις χορωδίες τζιτζικιών και τον ήχο της βροχής. Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης μελέτης είναι ότι αναλύονται άμεσα τα πραγματικά δεδομένα πεδίου που καταγράφονται, υπό κανονικές περιβαλλοντικές συνθήκες και με όλα τα συνακόλουθα προβλήματα των περιορισμών και του απροσδιόριστου ακουστικού περιεχομένου. Ειδικότερα, πριν από την ανάλυση, δεν αφαιρούνται τα τμήματα ήχου που περιέχουν θόρυβο αέρα και βροχή. Χρησιμοποιώντας τυχαία δειγματοληψία, επιτυγχάνεται αύξηση κατά 53% των αναγνωρισμένων ειδών σε σχέση με τις παραδοσιακές επιτόπιες έρευνες και αύξηση κατά 87% με τη χρήση συνδυασμών δεικτών για την καθοδήγηση της δειγματοληψίας. Γίνεται γνωστό επίσης πώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν συνδυασμοί των ίδιων δεικτών για την ανίχνευση ακουστικών γεγονότων

μεγάλης διάρκειας (όπως η έντονη βροχή και η χορωδία τζιτζικιών) και για την κατασκευή φασματογραφημάτων μεγάλης διάρκειας (24 ωρών).

Σε αυτή την έρευνα για να ληφθούν σταθμισμένοι συνδυασμοί δεικτών ήταν απαραίτητο να ομαλοποιηθούν όλοι οι δείκτες στο [0,1]. Οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές για την ομαλοποίηση εμφανίζονται σε παρενθέσεις στο τέλος κάθε περιγραφής. Οι τιμές κάτω από το ελάχιστο ή πάνω από το μέγιστο κόβονται σε 0 και 1 αντίστοιχα.

Δείκτης εντροπίας του φασματικού μέγιστου H [m]

Η εντροπία των φασματικών μεγίστων (H [m]): υπολογίζεται στο τμήμα 482-8820 Hz του φασματογράφου (ομαλοποίηση min / max = 0.0 / 1.0). Ο υπολογισμός του ακολουθείται από την εξής μεθοδολογία:

- Προσδιορισμός του διαστήματος συχνότητας σε κάθε φάσμα που έχει μέγιστο εύρος.
- Προετοιμασία ενός ιστογράμματος αναγνωριστικών διαστημάτων με μέγιστο φασματικό πλάτος.
- Υπολογισμός της εντροπίας του προκύπτοντος ιστογράμματος (του αριθμού των διαστημάτων) όπως περιγράφεται για τη φασματική εντροπία

$$H(m) = - \frac{\sum_i \log_2(pmf_i)}{\log_2(N)}$$

Δείκτης εντροπίας της φασματικής διακύμανσης H [v]

Η εντροπία της φασματικής διακύμανσης (H [v]): υπολογίζεται συγχρόνως με τη φασματική εντροπία (Hf), αλλά αντικαθιστά τον μέσο όρο κάθε δοχείου συχνότητας (σε όλα τα πλαίσια) με τη διαφορά του (ομαλοποίηση min / max = 0.0 / 1.0). Δηλαδή υπολογίζει τη διακύμανση των τιμών αντί του μέσου όρου κάθε κάδου συχνότητας.

Δείκτης φασματικής ποικιλότητας:

Μετράται ως ο αριθμός των διακριτών φασματικών συστάδων σε ένα τμήμα εγγραφής ενός λεπτού. Εφαρμόζουμε μια τροποποιημένη έκδοση του αλγόριθμου επαναληπτικής μάθησης ART1 ((Μοντέλο θεωρίας του προσαρμοστικού συντονισμού Adaptive Resonance Theory (ART)), σχεδιασμένου να συσσωρεύει δυαδικούς φορείς εισαγωγής (*Grossberg and Carpenter, 2002*). Το σημαντικό πλεονέκτημα σχετικά με την θεωρία του προσαρμοστικού συντονισμού είναι ότι δίνει στον χρήστη περισσότερο έλεγχο

στον βαθμό της σχετικής ομοιότητας των μοτίβων που τοποθετούνται στο ίδιο σύμπλεγμα. Οι τροποποιήσεις αφορούν κυρίως την ταχύτητα σύγκλισης της ομαδοποίησης (Towsey, 2013a). Η μεθοδολογία που ακολουθείται είναι η εξής :

- Μείωση του μήκους κάθε φάσματος στο ένα τρίτο (από 242 σε 80) με τις μέσες τιμές σε διαδοχικές ομάδες των τριών. (Οι δύο τελευταίες τιμές αγνοούνται.) Αυτό το βήμα γίνεται ώστε να μειωθεί το υπολογιστικό βάρος και να μειωθούν οι φασματικές λεπτομέρειες.
- Μετατροπή κάθε φάσματος (μήκος = 80) σε δυαδικό διάνυσμα χρησιμοποιώντας ένα πλάτος εύρους = 0,07.
- Προσδιορισμός του αριθμού των φασματικών κατηγοριών χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο ομαδοποίησης. Για να μειωθεί ο υπολογιστικός φόρτος, οι παράμετροι προσαρμόζονται ώστε να επιτυγχάνεται γρήγορη σύγκλιση.
- Μείωση της προκύπτουσας λίστας των φασματικών συστάδων αφαιρώντας ομάδες που περιέχουν μόνο ένα μέλος και συστάδες των οποίων το πρωτότυπο περιέχει μόνο μία μη μηδενική τιμή.

Ο τελικός αριθμός συμπλεγμάτων είναι ευαίσθητος στην επιλογή των φασμάτων που προετοιμάζουν τη διαδικασία ομαδοποίησης και σε άλλες επιλογές παραμέτρων. Παρόλα αυτά, είναι γενικά ενδεικτική της φασματικής ποικιλομορφίας σε μια εγγραφή ενός λεπτού. Το κατώφλι 0,07 είναι σχετικά υψηλό (~ 16 dB πάνω από τον τυπικό θόρυβο περιβάλλοντος) για να περιορίσει την ανίχνευση στα πτηνά κοντά στο μικρόφωνο και να μειώσει τον αριθμό των φασματικών συστάδων που προκύπτουν. Η μέγιστη καταμέτρηση συμπλεγμάτων σε κάθε λεπτό κατά τη διάρκεια των πέντε ημερών καταγραφής ήταν 16. Η μείωση του κατωφλίου εύρους στο 0.03 (~ 10 dB) αύξησε τον μέγιστο αριθμό συμπλέγματος σε 50 (ομαλοποίηση $\min / \max = 0/20$).

Δείκτης της φασματικής παραμονής:

Η φασματική επιμονή σχετίζεται με τη φασματική ποικιλομορφία με την εκτίμηση της μέσης διάρκειας των συστάδων που επιμένουν κατά μήκος του χρόνου (M. Towsey, J. Wimmer, I. Williamson, P. Roe, 2014). Κάθε πλαίσιο σε τμήμα ενός λεπτού αποδίδεται στο πλησιέστερο φασματικό σύμπλεγμα αυτού και προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο ομαδοποίησης. Για να μειωθεί ο υπολογιστικός φόρτος, οι παράμετροι προσαρμόζονται ώστε να επιτυγχάνεται γρήγορη σύγκλιση. Η φασματική αντοχή εμφανίζεται όταν διαδοχικά πλαίσια αποδίδονται στο ίδιο φασματικό σύμπλεγμα και ορίζεται ως η μέση διάρκεια (σε χιλιοστά του δευτερολέπτου) εκείνων των συστάδων που

διατηρούνται για περισσότερο από ένα πλαίσιο (ομαλοποίηση $\min / \max = 0/200$ ms).

Πρόσφατα, χρησιμοποιήθηκαν οκτώ μετρήσεις για την αναζήτηση ακουστικής υπογραφής διαφορετικών οικοτόπων στη Βόρεια Ελλάδα (*D. Bormpoudakis, J. Sueur, J. Pantis, 2013*). Αυτές οι μετρήσεις βασίστηκαν στο φάσμα συχνοτήτων, συμπεριλαμβανομένου του φασματικού κεντρικού πεδίου, της τυπικής απόκλισης, της κύρτωσης, του ρυθμού μηδενικής διέλευσης, της εντροπίας, της φασματικής ομοιότητας και της συσχέτισης Spearman με το τυχαίο ($1/f$) θόρυβο. Καμία από αυτές τις παραμέτρους δεν θεωρήθηκε ως δείκτης αλλά χρησιμοποιήθηκαν ως σύνολο περιγραφών. Ένας τυχαίος αλγόριθμος με όλες αυτές τις μετρήσεις απέδωσε σε μια ταξινόμηση έξι τύπων ενδιδαιτημάτων με πολύ χαμηλό ποσοστό σφάλματος (<1%). Οι σημαντικότερες παράμετροι στην ταξινόμηση ήταν το κεντροειδές, η φασματική ομαλότητα και η εντροπία που υποδηλώνουν ότι μπορούν να συμμετάσχουν σε συγκεκριμένα περιβαλλοντικά ηχητικά πρότυπα ενδιδαιτημάτων και θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να χαρακτηρίσουν και να διακρίνουν τα ενδιδαιτήματα.

2.5. Δείκτες Ηχοτοπίου

Μια άλλη οικογένεια δεικτών, είναι αυτή που προέρχεται άμεσα από την έννοια της οικολογίας του ηχοτοπίου, η οποία χωρίζει ένα ηχοτοπίο σε βιοφωνία, γεωφωνία και ανθρωποφωνία. Η βασική ιδέα είναι να εκτιμηθεί η σχετική συμβολή της βιοφωνίας σε σύγκριση με την γεωφωνία και την ανθρωποφωνία. Ο διαχωρισμός των πηγών αυτών των τριών συνιστώσεων δεν είναι εύκολο έργο. Επομένως χρησιμοποιήθηκε μια απλοποιημένη προσέγγιση που χωρίζει το φασματικό προφίλ του ηχητικού σκηνικού σε δύο κύριες περιοχές: (1) η ζώνη συχνοτήτων μεταξύ 0,2 και 2 kHz θα αποτελείται κυρίως από μηχανικά σήματα (ανθρωποφωνία), και (2) η ζώνη συχνοτήτων μεταξύ 2 και 8 kHz θα καταλαμβάνεται πρωτίστως από την παραγωγή ήχου ζώων (βιοφωνία). Ο ήχος λόγω του ανέμου ή της βροχής θα καλύπτει ολόκληρο το φάσμα με περισσότερη ενέργεια στις χαμηλότερες συχνότητες (*J. Qi, S. H. Gage, W. Joo, B. Napoletano, S. Biswas, 2008*). Αυτά τα όρια, τα οποία καθορίστηκαν αρχικά εμπειρικά, ελέγχθηκαν αργότερα με καταγραφές που λαμβάνονται κατά μήκος μιας αστικο-αγροτικής κλίσης (*W. Joo, S. H. Gage, E. P. Kasten, 2011*). Ωστόσο, αυτά τα όρια ενδέχεται να είναι ελαφρώς θεωρητικά, δεδομένου ότι είναι γνωστό ότι τα ζώα ενδέχεται να παράγουν ήχο κάτω των 2 kHz και άνω των 8 kHz (*J. Sueur et al. 2014*). Συγκεκριμένα, τα όρια αυτά πιθανόν να είναι διαφορετικά στα τροπικά ενδιδαιτήματα όπου η ακουστική ποικιλομορφία των ζώων δεν περιορίζεται τυπικά στη ζώνη συχνοτήτων 2-8 kHz.

Ακουστικός δείκτης λόγος βιοφωνίας – ανθρωποφωνίας (ρ)

Ένα επίπεδο ενεργείας ανά συνιστώσα ηχοτοπίου, δηλαδή ανά ζώνη συχνοτήτων, μπορεί να εκτιμηθεί στο φάσμα συχνοτήτων, το οποίο έχει διακριτοποιηθεί σε ανάλυση 1 kHz. Σε ένα ηχοτοπίο που υπάρχει έντονη ανθρωποφωνία, πιθανόν να υπάρξει μεροληψία στα αποτελέσματα των μετρήσεων της βιοφωνίας, αν δεν υπάρχουν συγκεντρωμένα δεδομένα μετρήσεων της ακουστικής δραστηριότητας σε επίπεδο ανθρωποφωνίας και βιοφωνίας. Η παρουσία του δείκτη αυτού ποσοτικοποιεί το σχετικό επίπεδο ενέργειας της ανθρωποφωνίας (a) και της βιοφωνίας (b) και για τον υπολογισμό του λόγου (b / a) που οδηγεί στον πρώτο δείκτη ηχητικής απόστασης, ο οποίος ουσιαστικά εκτιμά το σχετικό επίπεδο βιοφωνίας. Αυτή η αναλογία συμβολίστηκε αρχικά με το ελληνικό γράμμα ρ και υπολογίζεται ακολούθως :

$$\rho = b / a$$

Ακουστικός δείκτης βιοφωνίας B

Ο δείκτης αυτός πρωτοεμφανίστηκε σε μια μελέτη των *W. Joo, S. H. Gage, E. P. Kasten, 2011* που διεξήχθη στην ευρύτερη περιοχή του Λάνσινγκ τη πρωτεύουσα του Μίτσιγκαν, σε δεκαεφτά τοποθεσίες δειγματοληψίας. Τα ακουστικά δείγματα συλλέχθηκαν για 2 συνεχείς ημέρες το μήνα, από το Φεβρουάριο έως το Δεκέμβριο του 2006, για να αποτυπώσουν ημερήσια και εποχιακά σχέδια ήχου σε κάθε σημείο δειγματοληψίας. Για τον προσδιορισμό της ακουστικής έντασης σε κάθε ηχητικό δείγμα, η φασματική πυκνότητα ισχύος (PSD) υπολογίστηκε σε διαστήματα συχνότητας 1 kHz με βάση τον αλγόριθμο Welch, ο οποίος υπολογίζει τροποποιημένα χρονικά διαγράμματα επικαλυπτόμενων τμημάτων χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό Fast Fourier (FFT) για την εκτίμηση της μέσης φασματικής πυκνότητας ισχύος (Welch, 1967). Οι μετρήσεις βιοφωνίας προσδιορίστηκαν ως η εκτίμηση vPSD της ζώνης συχνοτήτων με το υψηλότερο vPSD μεταξύ των διαστημάτων συχνότητας από 2 έως 8 kHz. Για να εξεταστεί κατά πόσον η βιοφωνία μπορεί να αντιπροσωπεύσει βιολογικούς ήχους, επιλέχθηκαν τυχαία 100 δείγματα ήχου από τα 8091 δείγματα ήχου που συλλέχθηκαν και οι τιμές vPSD για βιοφωνία συγκρίθηκαν ακούγοντας τις ηχογραφήσεις και βλέποντας τα φασματογραφήματα τους.

Δείκτης κανονικοποιημένης διαφοράς του ηχοτοπίου (NDSI)

Οι Kasten et al. (2012) εισήγαγαν τον δείκτη κανονικοποιημένης διαφοράς ηχοτοπίου (NDSI), ο οποίος αν και δεν σχεδιάστηκε για να εκτιμήσει τα επίπεδα της ζωικής ποικιλότητας αλλά για να μετρήσει την ανθρωπογενή διαταραχή (υπολογίζοντας την αναλογία των ανθρωπογενών ήχων προς τους ήχους που παράγονται από βιολογικούς οργανισμούς) συσχετίζονται με την παρουσία πτηνών (Fuller et al., 2015).

$$\text{NDSI} = (\text{biophony} - \text{technophony}) / (\text{biophony} + \text{technophony}),$$

(biophony -> βιοφωνία & technophony -> τεχνοφωνία),

όπου η βιοφωνία και η τεχνοφωνία είναι οι αθροισμένες φασματικές πυκνότητες ισχύος (PSD) στις κατάλληλες ζώνες (McLaren, 2012). Ο στόχος του ομαλοποιημένου δείκτη ηχητικής απόκλισης (NDSI) είναι να υπολογίσει το επίπεδο ανθρωπογενών διαταραχών στο ηχητικό τοπίο, υπολογίζοντας την αναλογία ανθρωπογενών (ανθρωποφωνία) και βιολογικών (βιοφωνία) ακουστικών συστατικών που απαντώνται στο πεδίο σε δείγματα ηχητικών συλλογών. Ο NDSI δεν παραμένει σταθερός σε μια θέση στο ηχοτοπίο και οι αλλαγές ανάλογα με την ώρα της ημέρας ή την ημέρα του έτους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να σχεδιαστεί ο τρόπος με τον οποίο ο NDSI αλλάζει με την πάροδο του χρόνου. Σημειώστε ότι ο NDSI είναι ένας λόγος στο διάστημα [- 1 έως + 1], όπου + 1 υποδεικνύει ένα σήμα που δεν περιέχει ανθρωποφωνία. Ο δείκτης NDSI χρησιμοποιήθηκε σε μια βάση δεδομένων ηχοτοπίου για να εφαρμοστεί σε online δείγματα (E. P. Kasten, S. H. Gage, J. Fox, W. Joo, 2012) και να εξετάσει και να χαρτογραφήσει τις αλλαγές στη σύνθεση ηχοτοπίου σε ένα ιζηματογενές δάσος στη Βόρεια Αμερική (S. H. Gage, A. C. Axel, 2014). Το επίπεδο ενέργειας της ανθρωποφωνίας και της βιοφωνίας μπορεί επίσης να αντιμετωπιστεί ανεξάρτητα χωρίς να υπολογίζεται ένας λόγος όπως έγινε κατά την διερεύνηση των χωρικών και χρονικών προτύπων των χαρακτηριστικών του ηχοτοπίου της έκτασης σε μια αστικο-αγροτική κλίση του τοπίου [αξία βιοφωνίας (W. Joo, S. H. Gage, E. P. Kasten, 2011) αξία κορυφής της βιοφωνίας (B. Krause, S. H. Gage, W. Joo, 2011)].

Ακουστικός δείκτης κορύφωσης της βιοφωνίας (biopeak)

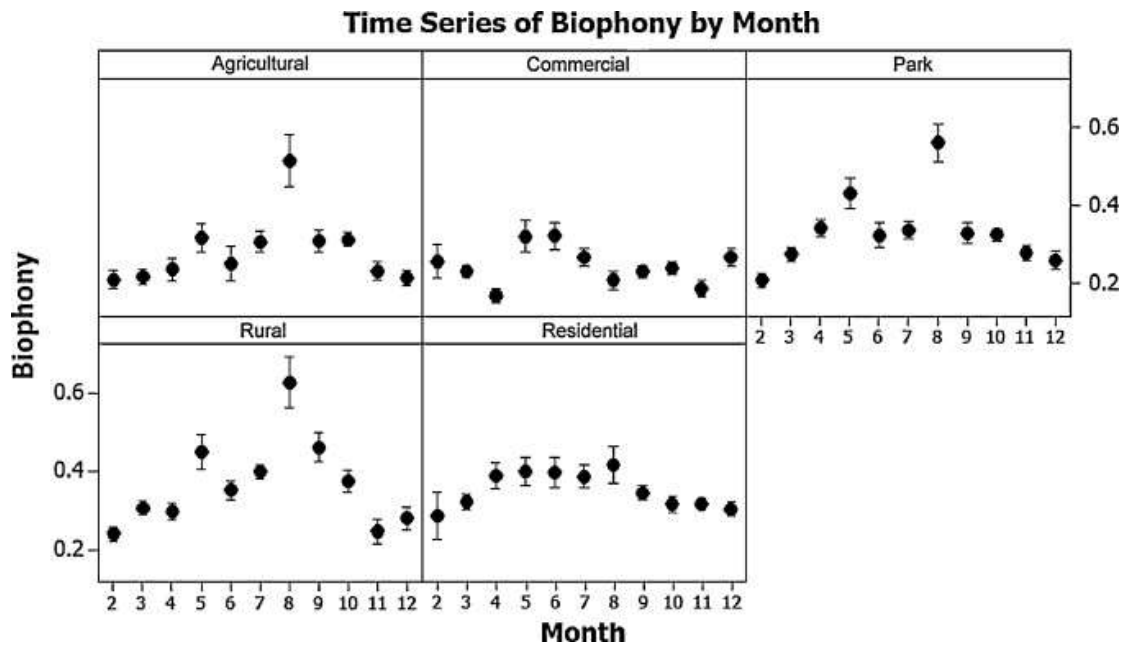
Ο δείκτης αυτός εκπονήθηκε στα πλαίσια μιας μελέτης που διεξήχθη στην ευρύτερη περιοχή του Λάνσινγκ τη πρωτεύουσα του Μίτσιγκαν, σε δεκαεφτά τοποθεσίες δειγματοληψίας. Η μεθοδολογία της έρευνας ακολουθήθηκε ως εξής: Τα ακουστικά δείγματα συλλέχθηκαν για 2 συνεχείς ημέρες το μήνα, από το Φεβρουάριο έως το Δεκέμβριο του 2006, για να αποτυπώσουν ημερήσια και εποχιακά σχέδια ήχου σε κάθε σημείο δειγματοληψίας. Επιλέχθηκαν ημέρες δειγματοληψίας χωρίς κακοκαιρία για να ελαχιστοποιήσουμε τους ήχους που παράγει το περιβάλλον. Σε κάθε θέση, αναπτύχθηκε μια μονάδα ακουστικής καταγραφής. Η τεχνολογία εγγραφής που χρησιμοποιήθηκε ήταν μια συσκευή εγγραφής κασέτας ήχου (SangeanVersaCorder®, C. Crane Co.) και ένα τροφοδοτούμενο μικρόφωνο (Model 330-3020, RadioShack Co.). Για τον προσδιορισμό της ακουστικής έντασης σε κάθε ηχητικό δείγμα, η φασματική πυκνότητα ισχύος (PSD) υπολογίστηκε σε διαστήματα συχνότητας 1 kHz με βάση τον αλγόριθμο Welch, ο οποίος υπολογίζει τροποποιημένα χρονικά διαγράμματα επικαλυπτόμενων τμημάτων χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό Fast Fourier (FFT) για την εκτίμηση της μέσης φασματικής πυκνότητας ισχύος (Welch, 1967). Ένα παράθυρο Hamming μεγέθους 512 με 50% επικάλυψη χρησιμοποιήθηκε μεταξύ τμημάτων, επίσης ένα πρόγραμμα

MATLAB (Mathworks, 2005) αναπτύχθηκε για την αυτόματη επεξεργασία μεγάλου αριθμού εγγραφών ήχου και φασματογραφήματων, οπτικοποιήσεων ήχου, μιας ενεργειακής τιμής (PSD) για κάθε ένα από τα 11 διαστήματα συχνότητας και διάφορους δείκτες ήχου. Οι μετρήσεις βιοφωνίας προσδιορίστηκαν ως η εκτίμηση κατανομή μεγέθους έντασης ((volume Partical Size Distribution (vPSD)) της ζώνης συχνοτήτων με το υψηλότερο vPSD μεταξύ των διαστημάτων συχνότητας από 2 έως 8 kHz. Για να εξεταστεί κατά πόσον η βιοφωνία μπορεί να αντιπροσωπεύσει βιολογικούς ήχους, επιλέχθηκαν τυχαία 100 δείγματα ήχου από τα 8091 δείγματα ήχου που συλλέχθηκαν και οι τιμές vPSD για βιοφωνία συγκρίθηκαν ακούγοντας τις ηχογραφήσεις και βλέποντας τα φασματογραφήματά τους. Υπολογίστηκε επίσης μια κυρίαρχη ζώνη ακουστικών συχνοτήτων μέσα σε κάθε ηχητικό δείγμα, το οποίο έχει τη φασματική πυκνότητα υψηλότερης ισχύος από 1 έως 8 kHz. Ο αριθμός των δειγμάτων ήχου που ταξινομήθηκαν κατηγορηματικά ως βιοφωνία ήταν 63. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η βιοφωνία αντιπροσωπεύει την παρουσία της βιοακουστικής. Έτσι, η εκτίμηση vPSD στη ζώνη συχνοτήτων με την υψηλότερη τιμή vPSD μεταξύ 2 και 8 kHz χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της έκτασης της βιοφωνίας. Εξετάσαμε τα χρονικά πρότυπα βιολογικών ήχων που καταγράφηκαν στις διάφορες χρήσεις γης (Σχήμα 5). Η τιμή βιοφωνίας στον Πίνακα 2 είναι η μέση μέγιστη βιοφωνία (\pm SE) για κάθε μήνα που έχει δειγματοληφτεί. Ο αριθμός σε αγκύλες είναι η ώρα της ημέρας κατά την οποία έλαβε χώρα η μέγιστη ποσότητα βιοφωνίας. Τα επισημασμένα δεδομένα υποδεικνύουν πότε προέκυψε η μεγαλύτερη ποσότητα βιοφωνίας σε κάθε τύπο χρήσης γης. Η μέγιστη βιοφωνία έγινε το βράδυ (22: 00) τον Αύγουστο σε όλους τους τύπους χρήσης της γης εκτός από τις εμπορικές τοποθεσίες.

Μήνας	Ύπαιθρος	Αστική ζώνη	Πάρκα	Γεωργική ζώνη	Εμπορικές Περιοχές
Feb.	0.28 \pm 0.03 (14)	0.35 \pm 0.02 (14)*	0.22 \pm 0.02 (14)	0.31 \pm 0.05 (10)	0.28 \pm 0.04 (14)*
Mar.	0.40 \pm 0.03 (6)	0.35 \pm 0.03 (6)	0.32 \pm 0.02 (2)	0.28 \pm 0.03 (10)	0.29 \pm 0.03 (10)
Apr.	0.34 \pm 0.04 (6)	0.55 \pm 0.06 (6)	0.44 \pm 0.04 (10)	0.40 \pm 0.05 (6)	0.21 \pm 0.03 (2)
May	0.63 \pm 0.06 (6)	0.45 \pm 0.06 (14)	0.70 \pm 0.04 (6)	0.43 \pm 0.06 (18)	0.59 \pm 0.07 (6)
Jun.	0.40 \pm 0.02 (22)	0.52 \pm 0.05 (10)	0.49 \pm 0.07 (10)	0.42 \pm 0.09 (22)	0.50 \pm 0.06 (14)

Μήνας	Υπαιθρος	Αστική ζώνη	Πάρκα	Γεωργική ζώνη	Εμπορικές Περιοχές
Jul.	0.44 ± 0.02 (6)	0.50 ± 0.04 (6)	0.40 ± 0.04 (6)	0.36 ± 0.03 (6)	0.32 ± 0.04 (6)
Aug.	0.93 ± 0.01 (22)	0.70 ± 0.07 (22)	0.85 ± 0.04 (22)	0.85 ± 0.03 (22)	0.28 ± 0.05 (22)
Sept.	0.57 ± 0.05 (18)	0.38 ± 0.02 (2)	0.42 ± 0.05 (22)	0.41 ± 0.05 (14)	0.30 ± 0.03 (10)
Oct.	0.45 ± 0.04 (2)	0.36 ± 0.02 (2)	0.35 ± 0.02 (2)	0.34 ± 0.02 (10)	0.36 ± 0.02 (2)
Nov.	0.33 ± 0.04 (14)	0.34 ± 0.02 (14)	0.35 ± 0.03 (14)	0.34 ± 0.04 (14)	0.21 ± 0.03 (10)
Dec.	0.34 ± 0.02 (2)	0.32 ± 0.02 (22)	0.30 ± 0.03 (2)	0.24 ± 0.03 (10)	0.37 ± 0.03 (18)
Μέση τιμή	0.36 ± 0.005	0.36 ± 0.005	0.33 ± 0.004	0.27 ± 0.005	0.24 ± 0.005

Πίνακας 2. Μέση μέγιστη βιοφωνίας (± SE) σε κάθε τύπο χρήσης γης για κάθε μήνα δειγματοληψίας (ο αριθμός σε παρενθέσεις είναι η ώρα που εμφανίστηκε βιοφωνία). Τα δεδομένα που δίνονται με έντονους χαρακτήρες δείχνουν πότε συνέβη το μεγαλύτερο μέρος της βιοφωνίας.



Σχήμα 5. Πρότυπα χρονικής αλλαγής της βιοφωνίας ανά μήνα για κάθε τύπο κάλυψης γης. Οι τιμές είναι μέσες \pm SE.

Σε γενικές γραμμές, η βιολογική ακουστική ενέργεια αυξήθηκε κατά τη διάρκεια της μετάβασης μιας κλίσης από αστικά διαμορφωμένες σε αγροτικές χρήσεις γης. Ο θόρυβος περιβάλλοντος μπορεί να περιλαμβάνει εκτός από απλούς ανθρώπινους ήχους και βιολογικά ακουστικά συστατικά. Διαπιστώσαμε ότι οι βιολογικοί ήχοι συσχετίζονται αρνητικά με τον ανθρωπογενή ήχο. Η μελέτη αυτή έδειξε επίσης ότι η ακουστική μεταβλητότητα του ηχητικού σκηνικού στην περιοχή μελέτης εξηγείται σε μεγάλο βαθμό από πολλαπλά χαρακτηριστικά τοπίου (δηλαδή τύποι χρήσης γης και απόσταση από τον έντονη κυκλοφοριακή οδική κυκλοφορία), πέρα από την απόσταση από ένα αστικό κέντρο.

2.6. Δείκτες μεταξύ ομάδων : β ακουστική πολυμορφία

Μια β ακουστική ποικιλομορφία θα πρέπει να βοηθήσει στον προσδιορισμό του κατά πόσο δύο ή περισσότερες ακουστικές κοινότητες ή ηχοτοπία είναι ακουστικά διαφορετικά, ή στην αξιολόγηση των αλλαγών μεταξύ δύο ημερομηνιών μιας υπό μελέτης κοινότητας ή τοπίου. Στην πορεία των ερευνών ανακύπτει πως το μέτρο της απόκλισης του ήχου δεν είναι απλό, καθώς ο ήχος μπορεί να ποικίλει ανεξάρτητα κατά μήκος των τριών διαστάσεων, δηλ. του χρόνου, της συχνότητας και του εύρους και η ομολογία

κατά μήκος καθεμίας από αυτές τις τρεις διαστάσεις μπορεί να μην είναι σαφής. Επιπλέον, στη συγκεκριμένη περίπτωση υπαίθριων εγγραφών, η απόσταση μεταξύ των πηγών (τα ζώα που καλούν) και του αισθητήρα (των ηχογράφων), μπορεί να προκαλέσει διακυμάνσεις πλάτους μεταξύ των εγγραφών που δεν πρέπει να ερμηνεύονται ως σχετικές διαφορές.

Μια πρώτη προσπάθεια σύγκρισης της ακουστικής παραγωγής των ζωικών κοινοτήτων έγινε συγκρίνοντας τους φακέλους πλάτους Hilbert και τα μεσαία φάσματα συχνότητας (*J. Sueur, S. Pavoine, O. Hamerlynck, S. Duvail, 2008*).

Ο δείκτης ακουστικής ανομοιομορφίας (D)

Ο δείκτης ακουστικής ποικιλότητας D εκτιμά την β ποικιλομορφία μεταξύ δύο ακουστικών κοινοτήτων και εισήχθη από τους Sueur et al., 2008b. Ο D είναι ο πολλαπλασιασμός δύο υποδεικτών: του **δείκτη χρονικής ανομοιομορφίας Dt** και του **δείκτη φασματικής ανομοιομορφίας Df** σύμφωνα με το οποίο,

$$D = Dt \times Df \text{ με το } 0 \leq D \leq 1.$$

Οι Dt και Df υπολογίζονται σύμφωνα με:

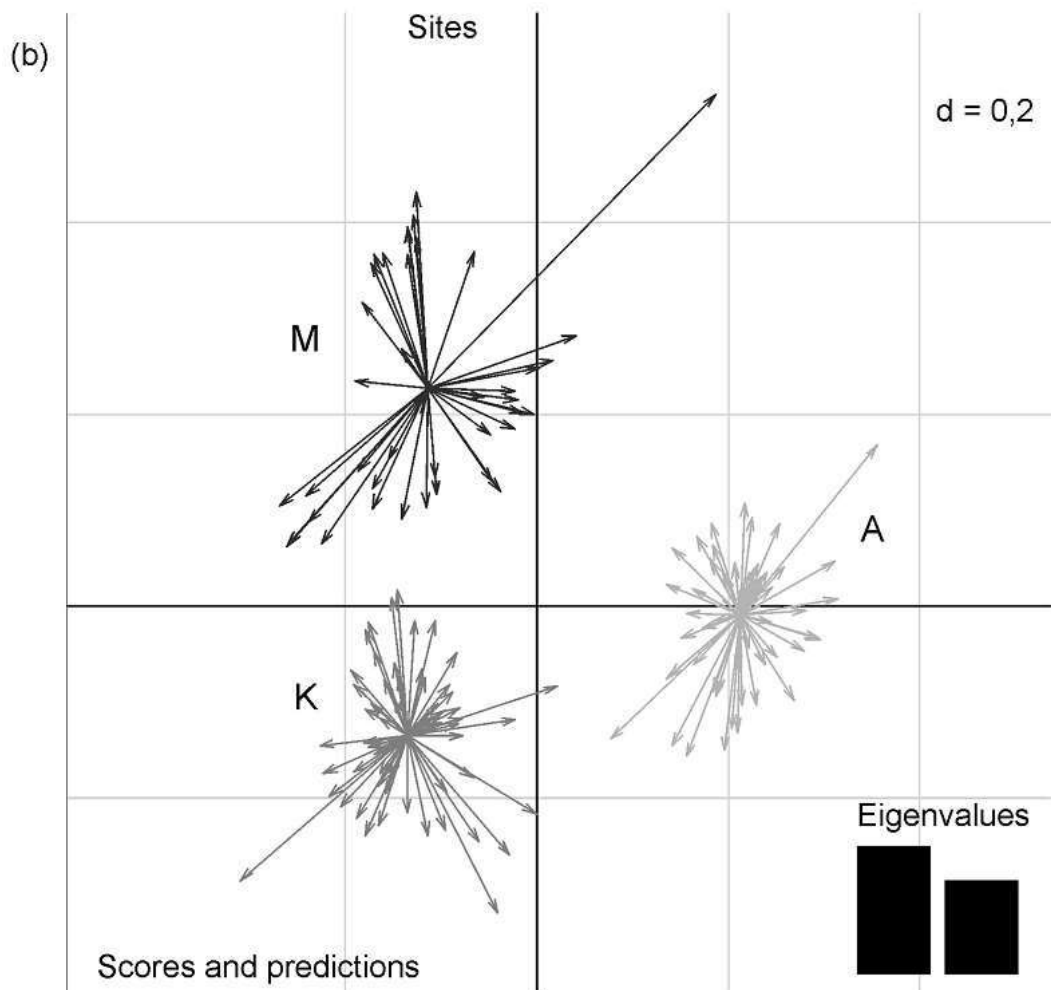
$$Dt = 0.5 \times \sum_{t=1}^n |A_1(t) - A_2(t)|$$

$$Df = 0.5 \times \sum_{f=1}^n |S_1(f) - S_2(f)|$$

όπου τα $A_1(t)$, $A_2(t)$ = οι συναρτήσεις μάζας πιθανότητας του περιβλήματος πλάτους για τις δύο συγκρίσιμες εγγραφές και $S_1(f)$, $S_2(f)$ = οι συναρτήσεις μάζας πιθανότητας του μέσου φάσματος για τις δύο συγκρίσιμες εγγραφές.

Ο Dt λαμβάνεται υπολογίζοντας το διάστημα εύρους κάθε ήχου, κλιμακώνοντας κάθε φάκελο με το ολοκλήρωμα του και υπολογίζοντας τη διαφορά για κάθε δείγμα χρόνου. Ομοίως, ο Df βασίστηκε στη διαφορά μεταξύ ενός ζεύγους μέσων φασμάτων. Κάθε φάσμα υπολογίστηκε ως ο μέσος όρος ενός μετασχηματισμού Fourier Short Time (STFT) με ένα παράθυρο ολίσθησης που δεν επικαλύπτεται (μήκος = 512 σημεία, ακρίβεια χρόνου = 0,012 s, ακρίβεια συχνότητας = 86 Hz). Κάθε φάσμα μετασχηματίστηκε σε μια συνάρτηση μάζας πιθανότητας $S_i(f)$ και η διαφορά υπολογίστηκε μεταξύ των δύο φασμάτων που θα συγκριθούν. Ο D τείνει προς 0 για παρόμοιο ήχο και προς 1 για ξεχωριστό ήχο. Αυτός ο δείκτης εφαρμόστηκε κατά τη σύγκριση δύο δασικών κοινοτήτων της Τανζανίας (*J. Sueur, S. Pavoine, O. Hamerlynck, S. Duvail, 2008*) και την ανάλυση των κοινοτήτων των πτηνών των δασών (*M. Depraetere, S. Pavoine, F. Jiguet, A. Gasc, S. Duvail, J. Sueur, 2012*). Ωστόσο, φαίνεται επίσης ότι ο δείκτης Dt απαιτεί έναν τέλειο χρονικό άξονα μεταξύ των φακέλων εύρους που πρέπει να συγκριθούν. Αυτή η αυστηρή επιταγή του χρονικού άξονα μπορεί να μην ικανοποιείται ακόμη και με συγχρονισμένες εγγραφές. Επομένως, ο υποδείκτης Dt δεν χρησιμοποιήθηκε

σε άλλες αναλύσεις και διατηρήθηκε μόνο ο υπο-δείκτης Df. Ο δείκτης Df αποκάλυψε σαφή χρονική και γεωγραφική διαφοροποίηση των απομακρυσμένων περιοχών της Νέας Καληδονίας (A. Gasc, J. Sueur, S. Pavoine, R. Pellens, P. Grandcolas, 2013) (Εικόνα 3) και επίσης επεσήμανε τα χρονικά και χωρικά πρότυπα μέσα σε μια έκταση τροπικού τροπικού δάσους στη Γαλλική Γουιάνα (A. Rodriguez, A. Gasc, S. Pavoine, P. Grandcolas, P. Gaucher, J. Sueur, 2014).



Εικόνα 3. β ακουστική ποικιλότητα σε περιφερειακή κλίμακα στη Νέα Καληδονία (a): Απεικονίστηκε ο ήχος τριών ακουστικών κοινοτήτων σε τρεις τοποθεσίες με τρία σημεία καταγραφής σε κάθε τοποθεσία: Αουρινιέ (A), Koghis (K) και Mandjélie (M). (b): Αποτελέσματα των πλεονασμών. Μία ανάλυση που εφαρμόστηκε στην κύρια ανάλυση συντεταγμένων ακουστικών αποστάσεων μεταξύ όλων των εγγραφών, με έναν παράγοντα "Site" ως επεξηγηματικό μεταβλητή, αποκαλύπτοντας μια σαφή ακουστική διαφορά μεταξύ των τριών ακουστικών κοινοτήτων. Το μήκος των βέλων αντιπροσωπεύει υπολείμματα: κάθε βέλος συνδέει τη θέση μιας εγγραφής που προβλέπεται από την τοποθεσία στην οποία έγινε (όπου το βέλος ξεκινά) στην πραγματική του θέση βασισμένη σε ακατέργαστα δεδομένα (πραγματική ακουστική σύνθεση όπου τελειώνει το βέλος). Τροποποιήθηκε από τους A. Gasc, J. Sueur, F. Jiguet, V. Devictor, P. Grandcolas, C. Burrow, M. Depraetere, S. Pavoine, 2013.

Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις άλλες μετρήσεις απόστασης για να συγκριθεί το μέσο φάσμα των τραγουδιών των πουλιών:

Η απόσταση Kolmogorov-Smirnov (KS),

Αυτός ο δείκτης είναι η μέγιστη απόσταση μεταξύ δύο συσσωρευμένων φασμάτων συχνοτήτων και ορίστηκε ως "η μέγιστη τιμή της απόλυτης διαφοράς μεταξύ δύο σωρευτικών λειτουργιών διανομής" από τον Rachev, 1991. Το όνομα το πήρε από το μη παραμετρικό τεστ στατιστικής των Kolmogorov & Smirnov.

Η συμμετρική απόσταση Kullback-Leibler (KL)

Αυτός ο δείκτης προήρθε με τον υπολογισμό της σχετικής εντροπίας μεταξύ δύο φάσεων συχνότητας πιθανότητας από τους Kullback and Leibler, 1951.

Ο συντελεστής συσχέτισης RV ομοιότητας

Ο δείκτης αυτός χρησιμοποιήθηκε όπως αναπτύχθηκε από τους Escoufier (1973) και Robert and Escoufier (1976). Η συσχέτιση RV μετρά τη συσχέτιση μεταξύ δύο μωσαϊκών. Ο μετασχηματισμός Fourier σύντομου χρόνου (STFT) υπολογίστηκε για κάθε εγγραφή που οδήγησε σε ένα μωσαϊκό δεδομένων. Οι στήλες κάθε μωσαϊκού ήταν τα διαδοχικά φάσματα που υπολογίστηκαν κατά μήκος της χρονικής κλίμακας με χρονική ακρίβεια 0,012 s και ακρίβεια συχνότητας 86 Hz. Η RV υπολογίστηκε σύμφωνα με τους Kazi-aoual et al. (1995) και Josse et al. (2008). Το συμπλήρωμα 1 - RV υπολογίστηκε για να ληφθεί ένα μέτρο ανομοιομορφίας.

Δείκτης αθροιστικής ανομοιομορφίας Dcf

Είναι ένας νέος δείκτης όπου χρησιμοποιήθηκαν ακουστικά φάσματα (φάσματα μετά από μετασχηματισμό σε κλίμακα Mel) αντί για κλασσικά γραμμικά φάσματα συχνότητας για να περιγράψουν το περιεχόμενο συχνότητας του κοινοτικού ήχου. Έχει εισαχθεί από τους *L. Lellouch, S. Pavoine, F. Jiguet, H. Glotin, J. Sueur, 2014* και λειτουργεί ως Df με τη διαφορά ότι λαμβάνει αθροιστικά φάσματα συχνοτήτων ως εισροές. Αυτός ο δείκτης έχει το πλεονέκτημα ότι είναι ευαίσθητος όχι μόνο στη φασματική επικάλυψη μεταξύ δύο φασμάτων αλλά και στη μέση απόσταση μεταξύ των διαφορετικών κορυφών συχνότητας των δύο φασμάτων. Ο Dcf, επίσης μπορεί να επιστρέψει χαμηλές τιμές όταν δύο Mel φάσματα διαφέρουν μόνο με μια μικρή αλλαγή συχνότητας, όταν άλλοι δείκτες επιστρέφουν μέγιστες τιμές. Αυτή η συμπεριφορά μειώνει δυνητικά τη μεροληψία προς τις υψηλές τιμές.

Εκτός από τους 28 δείκτες βιοποικιλότητας που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια, σε αυτή την εργασία παρουσιάζουμε ακόμα δύο ακουστικούς δείκτες βιοποικιλότητας, τον β δείκτη Phiindex του Pearson (Φ) και τον α βιοακουστικό δείκτη (BIO).

Ο δείκτης Phiindex του Pearson

Είναι ένας ευκλείδειος δείκτης που βασίζεται στον συντελεστή Συσχέτισης Pearson, που είναι ένα αριθμητικό μέτρο ή δείκτης του μεγέθους της συσχέτισης μεταξύ δύο συνόλων τιμών. Συγκεκριμένα, υπολογίζει καταλληλότερα την τάση για δύο κοινότητες να ανταλλάσσουν κοινά είδη ανεξάρτητα από τον αριθμό των ειδών που συνθέτουν κάθε κοινότητα (Jackson, Somers & Harvey 1989 και σε μη δημοσιευμένα αποτελέσματα). Ο δείκτης Phi του Pearson ορίζεται ως:

$$\phi = (1 - s)^{1/2}, \text{ with } s = (ad - bc) / [(a + b)(a + c)(d + b)(d + c)]^{1/2},$$

και οι συντελεστές a, b, c και d ορίζονται ως ο αριθμός των παρατηρηθέντων ειδών: (a) στις δύο συγκρινόμενες κοινότητες, b) μόνο στην πρώτη κοινότητα · c) μόνο στη δεύτερη κοινότητα · (d) σε καμία από τις δύο κοινότητες.

Βιοακουστικός δείκτης (BIO)

Ο δείκτης αυτός υπολογίζεται εκτιμώντας την συνολική έκταση κάτω από μια καμπύλη φάσματος σε ένα διάγραμμα πλάτους συχνότητας και βασίζεται σε διαφορές στις μέγιστες εντάσεις (σε όλες τις συχνότητες που λαμβάνονται από δειγματοληψία) για την ανίχνευση διαφορών στις ζωικές κοινότητες.

3. Κριτήρια επιλογής ακουστικών δεικτών

Η διαδικασία επιλογής ενός μεμονωμένου ή ενός συνδυασμού ακουστικών δεικτών για την εκτίμηση της βιοποικιλότητας, πιθανόν να αποτελέσει μια δύσκολη υπόθεση για τον ερευνητή, καθώς τα κριτήρια επιλογής ενός ακουστικού δείκτη ή ενός συνδυασμού δεικτών, για την εκτίμηση της βιοποικιλότητας ενός ενδιαιτήματος τείνουν να είναι πολυπαραγοντικά. Κάποιες από τις παραμέτρους που θα παίξουν σημαντικό ρόλο είναι: ο τύπος του ενδιαιτήματος (δομή βλάστησης και σύνθεση), οι διαφορετικές μέθοδοι δειγματοληψίας, η απόσταση της τοποθεσίας μελέτης από αστικές ή αγροτικές περιοχές, η ταυτότητα των ειδών που κατοικούν στο ενδιαίτημα, οι κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής, η χωρική και η χρονική κατανομή της δειγματοληψίας, καθώς επίσης το είδος των εκτιμήσεων που θέλουμε να κάνουμε, αν δηλ. θέλουμε να εκτιμήσουμε τον πλούτο των ειδών σε μια κοινότητα ή την ποικιλομορφία των ειδών εντός μιας κοινότητας ή μεταξύ δύο ή και περισσότερων κοινοτήτων. Τα κριτήρια επιλογής ενός ακουστικού δείκτη που θέτουμε σε αυτή την εργασία, πηγάζουν από τα αποτελέσματα των ερευνών ακουστικής οικολογίας που έχουν πραγματοποιηθεί τα τελευταία χρόνια και είναι διαθέσιμα σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά. Στοχεύουν στο να αποτελέσουν ένα σημαντικό εργαλείο για τη διευκόλυνση του αναγνώστη στην εφαρμογή των ακουστικών δεικτών εκτίμησης της βιοποικιλότητας μέσω ακουστικών μεθόδων δειγματοληψίας.

3.1. Συσχέτιση των δεικτών με το θόρυβο του περιβάλλοντος (υποβάθρου)

Σε μια μελέτη που έγινε σε τρεις ορεινές τοποθεσίες της Νέα Καληδονίας (Gasc *et al.* 2013), ο NP βρέθηκε να είναι ευαίσθητος δείκτης στον θόρυβο του περιβάλλοντος. Σε μια μελέτη που έγινε σε ημιτροπικές περιοχές της Αυστραλίας το 2010 (S. Fuller *et al.* 2015), η φασματική ποικιλότητα απέδωσε τα πιο σταθερά αποτελέσματα σε ημέρες με καλό και καιρό με ανέμους, ενώ στην ίδια μελέτη ο ACI βρέθηκε να είναι ο πιο ευαίσθητος δείκτης στην παρουσία του ανέμου. Σε μια άλλη έρευνα που έγινε σε 15 τοποθεσίες του Λονδίνου το 2013 (A.J. Fairbrassa *et al.* 2017), σε εγγραφές χαμηλής συχνότητας (0-12 kHz), ο NDSI φάνηκε να μην επηρεάζεται και συσχετίστηκε θετικά τόσο με τον θόρυβο της ανθρωποφωνίας, όσο και με τον θόρυβο της γεωφωνίας ενώ οι δείκτες ACI, ADI & B έδειξαν να επηρεάζονται και συσχετίστηκαν αρνητικά με την παρουσία του θορύβου της ανθρωποφωνίας. Σε μια άλλη έρευνα με προσομοιωμένες εγγραφές συγκροτημάτων πουλιών υπό διαφορετικές συνθήκες πεδίου, από τους δείκτες ποικιλομορφίας ((ACI, NP, AR, M, H, H(t) & H(f)) που εξετάστηκαν, οι δείκτες NP και AR εμφάνισαν τη χαμηλότερη ευαισθησία στο πλάτος του θορύβου υποβάθρου. Σε μια άλλη έρευνα (Sueur *et al.* 2008) που έγινε σε δύο κοντινές παράκτιες δασικές περιοχές της Τανζανίας με έντονη ξηρασία, κάποιος θόρυβος εξαιτίας του

ανέμου, του τρεχούμενου νερού ή των ανθρώπινων δραστηριοτήτων θα μπορούσε να μειώσει την αξιοπιστία του δείκτη H. Σε μια έρευνα που έγινε στο Περιφερειακό Πάρκο της Haute-Vallée de Chevreuse στη Γαλλία (*M. Depraetere et al. 2011*), ο θόρυβος του περιβάλλοντος λόγω των αεροπλάνων, των αυτοκινήτων, των γεωργικών μηχανημάτων ή της αμαξοστοιχίας έβλαψε σοβαρά τις μετρήσεις δημιουργώντας ένα αρκετά επίπεδο φάσμα και συνεπώς ψευδείς υψηλές τιμές του δείκτη Hf. Αυτή η προκατάληψη δεν επηρέασε τον δείκτη Ht που βασίζεται στο φάκελο εύρους του σήματος και έτσι χρησιμοποιήθηκε ως δείκτης της ποικιλίας των φωνητικών ζώων. Στην ίδια έρευνα ο κακός καιρός είχε τον ισχυρότερο αντίκτυπο στον δείκτη AR, με τον άνεμο και τη βροχή να προκαλούν υπερεκτίμηση του AR. Επίσης ο ACI έχει αναφερθεί ότι είναι ανθεκτικός στον συνεχή θόρυβο που παράγεται από το αεροπλάνο, αλλά είναι ευαίσθητος στον τυχαίο θόρυβο όπως ο άνεμος, η βροχή και η ακανόνιστη κυκλοφορία των μηχανημάτων. Σε μια άλλη μελέτη που έγινε σε ένα ορεινό δάσος οξιάς στο εθνικό πάρκο της Τοσκάνης-Αιμιλιανής Απενίνι στην Ιταλία (*N. Pieretti et al. 2010*), έχει φανεί ότι η ανθρώπινη φωνή και οι ήχοι που παράγονται από άλλους οργανισμούς (π.χ. τζίτζικια) ανιχνεύονται από τον ACI. Η κόρνα ενός αυτοκινήτου, μια καμπάνα, οποιοσδήποτε διακοπτόμενος ανθρωποφωνικός ήχος έως και μια βιομηχανία, μπορεί να προκαλέσει μια γρήγορη διακύμανση εντάσεων και ο ACI θα το καταχωρήσει. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να χρησιμοποιείται κατά προτίμηση σε ηχητικά τοπία hi-fi (sensu Schafer, 1977), γιατί σε περίπτωση που υπάρχουν αυτές οι πηγές θορύβου, οι αναλύσεις του ACI δεν θα έδιναν αξιόπιστα αποτελέσματα. Από την άλλη πλευρά, θα μπορούσε να είναι τέλειος (ACI) σε αναλύσεις, όπου ο ανθρωπογενής θόρυβος που υπάρχει στο ηχητικό τοπίο χαρακτηρίζεται από σταθερές εντάσεις, όπως αυτή που παράγεται από αεροπλάνα ή μεταφορές αυτοκινήτων. Σε μια έρευνα που πραγματοποιήθηκε σε δεκαεννέα δασικές τοποθεσίες στην ανατολική Αυστραλία (*S. Fuller et al. 2015*), για την εκτίμηση του επιπέδου κατακερματισμού του τοπίου και της οικολογικής κατάστασης των περιοχών, οι υψηλές νυχτερινές τιμές του NDSI αντανακλούν την υψηλή βιοφωνία σε σχέση με την ανθρωποφωνία, γεγονός που υποδηλώνει ότι υπάρχει υψηλό επίπεδο νυχτερινής βιοφωνίας (έντομα, αμφίβια), όπως στον H και τον ADI που ανιχνεύεται κατά τη διάρκεια της ησυχίας της νύχτας, όταν υπάρχει χαμηλή ανθρωποφωνία και άλλοι ήχοι υπόβαθρου. Ενώ οι σχετικά χαμηλές τιμές NDSI που παρατηρούνται καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας μπορεί επίσης να υποδηλώνουν μετατόπιση της αναλογίας της ανθρωποφωνίας προς τη βιοφωνία με υψηλότερα επίπεδα ανθρωπογενούς ήχου που αυξάνονται καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας σε σχέση με τους βιολογικούς ήχους. Σε μια άλλη έρευνα που έγινε σε τρεις διαφορετικές τροπικές τοποθεσίες του Ατλαντικού δάσους στη Βραζιλία, ο ACI βρέθηκε να είναι ένας από τους καλύτερους δείκτες της βιοποικιλότητας μιας κοινότητας πουλιών μεταξύ ενός καταλόγου 14 διαφορετικών ακουστικών δεικτών, με αδυναμίες λόγω της ευαισθησίας στις ριπές ανέμου. Οι Towsey et al. διαπίστωσαν ότι ο ACI ανταποκρινόταν σε ριπές ανέμου και ότι δεν αντιπροσώπευε με ακρίβεια τη βιολογική κοινότητα σε αντίξοες μετεωρολογικές συνθήκες. Σε μια άλλη έρευνα που έγινε σε δύο περιοχές της επαρχίας Yunnan της νότιας Κίνας (*C. Mammides et al. 2017*), ο NDSI δεν

παρουσίασε σταθερά πρότυπα. Θεωρητικά, τα διαφορετικά επίπεδα ανθρωπογενούς θορύβου μπορούν να οδηγήσουν σε ανόμοιες τιμές NDSI ακόμη και όταν ο πλούτος των ειδών είναι σχετικά σταθερός. Αντίθετα, σχετικά μεγάλες διαφορές στον πλούτο των ειδών μπορεί να οδηγήσουν μόνο σε μικρές αλλαγές στο NDSI εάν ο ανθρωπογενής θόρυβος δεν ποικίλει πολύ και είναι ιδιαίτερα χαμηλός. Κατά συνέπεια, ο δείκτης μπορεί να μην αντικατοπτρίζει με ακρίβεια τον πλούτο των κοινοτήτων πουλιών υπό αυτές τις συνθήκες. Στην ίδια έρευνα αναφέρεται πως ο δείκτης ακουστικής πολυπλοκότητας (ADI) πιστεύεται ότι είναι ευαίσθητος σε ορισμένους ανθρωπογενείς θορύβους και γεωφωνίες, όπως ο άνεμος και η βροχή (*Depraetere et al., 2012*), και αυτό μπορεί εν μέρει να εξηγήσει τις χαμηλές συσχετίσεις στην περίπτωση μας.

3.2. Ευαισθησία του ακουστικού δείκτη στο εύρος σήματος

Σε μια έρευνα που έγινε σε ημιτροπικές περιοχές της Αυστραλίας το 2010 (*S. Fuller et al. 2015*), βρέθηκε πως κανένας από τους H [t], H [s], NP και ACI δεν έχει ευαισθησία στο εύρος σήματος, αφού οι υπολογισμοί τους «κανονικοποιούν» τις πληροφορίες εύρους. Στην ίδια μελέτη βρέθηκε πως ο Dcf έχει το κύριο πλεονέκτημα να επιστρέφει χαμηλές τιμές όταν δύο Mel φάσματα διαφέρουν μόνο με μια μικρή αλλαγή συχνότητας, όταν άλλοι δείκτες επιστρέφουν μέγιστες τιμές και αυτή η συμπεριφορά μειώνει δυνητικά τη μεροληψία προς τις υψηλές τιμές. Σε μια άλλη έρευνα με προσομοιωμένες εγγραφές συγκροτημάτων πουλιών υπό διαφορετικές συνθήκες πεδίου, από τους δείκτες ποικιλομορφίας ACI, NP, AR, M, H, H(t) & H(f) που εξετάστηκαν ο ACI είχε τις καλύτερες επιδόσεις στο να συλλαμβάνει διαστάσεις εύρους και συχνότητας.

3.3. Συσχέτιση των δεικτών με τον πλούτο των ειδών

Σε μια μελέτη που έγινε σε τρεις ορεινές τοποθεσίες της Νέα Καληδονίας, ο NP επέστρεψε παρόμοιες τιμές για τις τρεις τοποθεσίες δειγματοληψίας που έχουν παρόμοια επίπεδα σε πλούτο ειδών. Σε μια έρευνα που έγινε σε ημιτροπικές περιοχές της Αυστραλίας το 2010 (*S. Fuller et al. 2015*), οι δείκτες που αναγνώρισαν τα περισσότερα είδη σε 60 δείγματα ήταν οι H [v], ACI και D [f]. Σε μια άλλη έρευνα (*J. Sueur et al. 2008*) που έγινε σε δύο κοντινές παράκτιες δασικές περιοχές της Τανζανίας με έντονη ξηρασία, βρέθηκε πως υψηλότερες τιμές του δείκτη της ακουστικής εντροπίας (H) θα έδειχναν έπεται πλουσιότερα ενδιαιτήματα. Η μεταβλητότητα του H μειώνεται με τον αριθμό των ειδών υποδηλώνοντας ότι μπορεί να αναμένεται κάποιο σφάλμα σε

κοινότητες με πολύ λίγα είδη. Τα αποτελέσματα δείχνουν πρώτα ότι υπάρχει μεγαλύτερη ποικιλία στο παρθένο δάσος. Αυτό θα έδειχνε επίσης την ύπαρξη τουλάχιστον τριών ακουστικών κοινοτήτων με λίγες αλληλεπικαλύψεις μεταξύ των τραγουδιών των ειδών στο παρθένο δάσος ενώ θα μπορούσε να υπάρχει μόνο μία κοινότητα στο υποβαθμισμένο δάσος με περισσότερες ακουστικές παρεμβολές μεταξύ των ειδών. Η υψηλότερη ποικιλότητα που εντοπίστηκε στο παρθένο δάσος φαίνεται να οφείλεται σε μεγαλύτερο αριθμό ειδών και στην ισορροπία στη σχετική αφθονία τους. Σε μια έρευνα που έγινε στο Περιφερειακό Πάρκο της Haute-Vallée de Chevreuse στη Γαλλία (*M. Depraetere et al. 2011*), βρέθηκε πως τα αποτελέσματα AR είναι ενθαρρυντικά για το πλούτο των ειδών που εξετάστηκαν. Σε μια έρευνα που πραγματοποιήθηκε σε δεκαεννέα δασικές τοποθεσίες στην ανατολική Αυστραλία (*S. Fuller et al. 2015*), για την εκτίμηση του επιπέδου κατακερματισμού του τοπίου και της οικολογικής κατάστασης των περιοχών, διαπιστώθηκε ότι τρεις δείκτες (NDSI, H και AEI), ήταν αντιπροσωπευτικοί της οικολογικής κατάστασης και του πλούτου των ειδών των πτηνών με τους NDSI και H να δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα. Σε μια άλλη έρευνα που έγινε σε δύο περιοχές της επαρχίας Yunnan της νότιας Κίνας (*C. Mammides et al. 2017*), από τους επτά δείκτες που μετρήθηκαν (AR, NDSI, ACI, BIO, H, AEI & ADI), κανένας δείκτης δεν έδειξε πολύ ισχυρή συσχέτιση με τον πλούτο ή την ποικιλομορφία των ειδών. Τρεις ακουστικοί δείκτες (H, AEI & ADI) απέδωσαν καλύτερα σε σταθερή βάση από τους άλλους τέσσερις, δείχνοντας μέτριες συσχετίσεις. Στην ίδια έρευνα ο δείκτης ακουστικού πλούτου (AR), ο οποίος βρέθηκε να συσχετίζεται θετικά με τον πλούτο των ειδών των πτηνών σε εύκρατα περιβάλλοντα (*Depraetere et al., 2012*), έδειξε την αντίθετη τάση στην περίπτωση μας. Για τα δεδομένα μας, γενικά όσο υψηλότερος είναι ο πλούτος των πτηνών, τόσο χαμηλότερη ήταν η τιμή αυτού του δείκτη. Σε μια άλλη μελέτη ο Harris et al. (2016) διαπίστωσε ότι ο δείκτης ακουστικής πολυπλοκότητας (ADI) συσχετίστηκε σε μεγάλο βαθμό με την ποικιλία και την ομοιότητα των ζώων στις κοινότητες των ψαριών.

3.4. Η αλληλεπίδραση των δεικτών

Σε μια μελέτη που έγινε σε ημιτροπικές περιοχές της Αυστραλίας το 2010 (*S. Fuller et al. 2015*), η φασματική ποικιλομορφία απέδωσε τα πιο σταθερά αποτελέσματα, είτε μόνος είτε σε συνδυασμό με άλλους δείκτες, ενώ η συσχέτιση μεταξύ της ακουστικής ποικιλομορφίας, του εκθετικού δείκτη Shannon και της σχετικής αφθονίας υποδεικνύει ότι τα λιγότερο άφθονα είδη είναι σημαντικά για την εξήγηση του επιπέδου της ακουστικής ποικιλομορφίας σε μια κοινότητα. Στην ίδια μελέτη οι πέντε δείκτες ανομοιομορφίας (Df, Dt, D, Ks, KL) συσχετίστηκαν σε υψηλό βαθμό όταν εφαρμόστηκαν σε καταγραφές πεδίου και σε προσομοιωμένες ακουστικές κοινότητες, υποστηρίζοντας προηγούμενα αποτελέσματα σε προσομοιωμένα δεδομένα (*Gasc et al., 2013a*). Εντούτοις ο δείκτης Dcf, ο οποίος βασίζεται στο συσσωρευμένο φάσμα, έδειξε ελαφρώς χαμηλότερη συσχέτιση με τους άλλους δείκτες, υποδεικνύοντας ότι μπορεί να περιέχει και να παρέχει έναν άλλο τρόπο μέτρησης της φασματικής ανομοιομορφίας. Είναι προτιμότερο να μην

χρησιμοποιείται ένας μόνο δείκτης, τουλάχιστον σε προκαταρκτικές αναλύσεις, αλλά να υπολογίζονται δύο δείκτες, κατά προτίμηση οι δείκτες Df και Dcf, οι οποίοι μπορούν ενδεχομένως να παράσχουν συμπληρωματικές πληροφορίες. Σε μια έρευνα που έγινε στο Περιφερειακό Πάρκο της Haute-Vallée de Chevreuse στη Γαλλία (*M. Depraetere et al. 2011*), βρέθηκε πως οι δείκτες ACI και AR μπορούν να θεωρηθούν ως συμπληρωματικοί δείκτες και θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν μαζί με τον δείκτη D για να αποτυπωθεί μια πολυδιάστατη εκτίμηση της ακουστικής κοινότητας. Στην έρευνα που περιγράφει τη χωρική και χρονική διακύμανση της δομής και της σύνθεσης της κοινότητας πτηνών στη Γαλλία από το 2001, επιβεβαιώθηκε ισχυρή συσχέτιση μεταξύ της ακουστικής ποικιλομορφίας (ACI) και του ακουστικού πλούτου AR (*Depraetere et al., 2012, Sueur et al., 2008b*) όταν εξετάζονται οι διαφοροποιήσεις που υπολογίζονται από τον δείκτη φυλογενετικής ποικιλότητας (*Chao et al.*) χωρίς διορθώσεις. Η ισχυρή συσχέτιση μεταξύ ACI και του αντίστροφου δείκτη Gini-Simpson αναμενόταν όπως ο δείκτης της φυλογενετικής ποικιλότητας βασίζεται κυρίως στον αντίστροφο δείκτη Gini-Simpson. Η υψηλή συσχέτιση μεταξύ των δεικτών ακουστικής, λειτουργικής και φυλογενετικής ποικιλότητας υποδεικνύει ότι ο δείκτης ακουστικής ποικιλομορφίας ACI, όπως υπολογίζεται εδώ, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως αποδεκτό υποκατάστατο των φυλογενετικών και λειτουργικών δεικτών διαφοροποίησης. Σε μια έρευνα που πραγματοποιήθηκε σε δεκαεννέα δασικές τοποθεσίες στην ανατολική Αυστραλία (*S. Fuller et al. 2015*), για την εκτίμηση του επιπέδου κατακερματισμού του τοπίου και της οικολογικής κατάστασης των περιοχών, Η σύγκριση των έξι ακουστικών δεικτών (ACI – NDSI – H – AEI – ADI – BIO) αποκάλυψε ότι ο ACI και ο BIO παρουσίαζαν παρόμοια μοτίβα που υπογράμμισαν μια ξεχωριστή χορωδία αυγής και σούρουπου των πτηνών. Οι μετρήσεις ACI και BIO υπολογίζονται με βάση τη μεταβολή στο φασματικό πλάτος (ή την ένταση του σήματος), αν και ο δείκτης BIO δεν λαμβάνει υπόψη τους ήχους στην εμβέλεια της ανθρωποφωνίας (0-2 kHz), ενώ ο ACI τους λαμβάνει υπόψη. Οι δείκτες αυτοί αντικατοπτρίζουν την ένταση του ήχου στο τοπίο και έχουν αποδειχθεί ότι συσχετίζονται με τον αριθμό των φωνητικών πουλιών (*Pieretti et al., 2011*) και την αφθονία των ειδών των πτηνών (*Boelman et al., 2007*). Στην ίδια έρευνα ο NDSI παρείχε ένα πρότυπο που ήταν γενικά ένας συνδυασμός τόσο ACI / BIO όσο και H / ADI. Σε μια άλλη έρευνα που έγινε σε δύο περιοχές της επαρχίας Yunnan της νότιας Κίνας οι Machado et al. (2017) διαπίστωσαν ότι ο δείκτης ADI συσχετίστηκε σε μεγάλο βαθμό με τους δείκτες AEI και H. Και οι τρεις δείκτες διαιρούν τους ήχους σε πολλαπλές ζώνες συχνότητας και συνεπάγονται μέτρηση της ποικιλίας του ακουστικού σήματος (*Sueur et al., 2008b, Villanueva-Rivera et al., 2011*) και αυτό είναι πιθανό να είναι ένα βασικό χαρακτηριστικό που συνυπολογίζεται όταν εκτιμάται η πολυπλοκότητα των ακουστικών κοινοτήτων.

3.5. Συσχέτιση των δεικτών με τη ακουστική δραστηριότητα

Σε μια μελέτη που έγινε σε τρεις ορεινές τοποθεσίες της Νέα Καληδονίας (A. Gasc *et al.* 2013) ο NP συνδέεται με το επίπεδο ακουστικής δραστηριότητας των ζώων, το οποίο ορίζεται εδώ ως ένας αριθμός διαφορετικών τύπων τραγουδιών. Σε μια έρευνα που έγινε σε 15 τοποθεσίες του Λονδίνου το 2013 (A.J. Fairbrassa *et al.* 2017), σε εγγραφές χαμηλής συχνότητας (0-12 kHz), οι δείκτες ACI, B και NDSI συσχετίστηκαν πολύ θετικά με τη βιοφωνία, ενώ οι δείκτες οι ACI και B συσχετίστηκαν θετικά με την ανθρωποφωνία, ο NDSI συσχετίστηκε αρνητικά με την ανθρωποφωνία. Όλοι εκτός από έναν δείκτη (B) συσχετίστηκαν θετικά με τη γεωφωνία. Στην ίδια μελέτη στις εγγραφές υψηλής συχνότητας (12-96kHz), ο δείκτης ACI συσχετίστηκε πολύ θετικά τόσο με τη βιοφωνία όσο και με την ανθρωποφωνία, ενώ ήταν αμερόληπτος στη γεωφωνία. Ο δείκτης ADI δεν συσχετίστηκε ούτε με τη βιοφωνία ούτε με την ανθρωποφωνία, και συσχετίστηκε θετικά με τη γεωφωνία.

3.6. Συσχέτιση των δεικτών με την ακουστική ετερογένεια

Σε μια έρευνα που έγινε σε 15 τοποθεσίες του Λονδίνου (A.J. Fairbrassa *et al.* 2017) το 2013, σε εγγραφές χαμηλής συχνότητας (0-12 kHz), τρεις δείκτες ο ACI, ο B και ο NDSI συσχετίστηκαν θετικά με τη βιοφωνική ετερογένεια. Ο B συσχετίστηκε θετικά με την ανθρωποφωνική ετερογένεια, ενώ οι ADI και NDSI συσχετίζονταν αρνητικά. Όλοι οι δείκτες (ACI, B, NDSI & ADI) συσχετίστηκαν θετικά με την γεωφωνική ετερογένεια. Στην ίδια μελέτη σε εγγραφές υψηλής συχνότητας (12-96kHz), ο ACI δεν συσχετίζεται με οποιαδήποτε από τις συνάψεις της ακουστικής ετερογένειας, ενώ ο ADI συσχετίζεται αρνητικά τόσο με την βιοφωνική όσο και με την ανθρωποφωνική ετερογένεια, ενώ συσχετίζεται θετικά με τη γεωφωνική ετερογένεια. Μια έρευνα που έγινε σε δύο κοντινές παράκτιες δασικές περιοχές της Τανζανίας (N. Pieretti *et al.* 2010) με έντονη ξηρασία, έδειξε πως αν ορισμένα είδη κυριαρχούν στον ακουστικό χώρο, τότε η ποικιλομορφία θα είναι χαμηλή. Μεγαλύτερη αφθονία των ειδών μπορεί στη συνέχεια να μειώσει σημαντικά την ακουστική ποικιλομορφία ενός ενδιαιτήματος, καθώς μειώνει τον κλασικό δείκτη ποικιλομορφίας όπως ο δείκτης Shannon. Σε μια έρευνα που έγινε στο Περιφερειακό Πάρκο της Haute-Vallée de Chevreuse στη Γαλλία (M. Depraetere *et al.* 2011), βρέθηκε πως ούτε ο δείκτης Hf ούτε ο Ht μπορούν να εκτιμήσουν την πυκνότητα της κοινότητας, δηλ. τον αριθμό των ειδών που τραγουδούν. Τα συγκεκριμένα είδη για κάθε βιότοπο συλλαμβάνονται καλύτερα από τον ακουστικό δείκτη D που αποκαλύπτει τις διαφορές στις δομές της κοινότητας. Σε μια άλλη έρευνα που έγινε σε δύο περιοχές της επαρχίας Yunnan της νότιας Κίνας (C. Mammides *et al.* 2017), φάνηκε πως τα επίπεδα της περιβαλλοντικής ετερογένειας μεταξύ των τοποθεσιών δεν φαίνεται να επηρεάζουν την απόδοση οποιουδήποτε από τους δείκτες που εξετάστηκαν (AR, NDSI, ACI, BIO, H, AEI & ADI), υποδεικνύοντας συνέπεια.

3.7. Συσχέτιση των δεικτών με τη ταυτότητα των ειδών

Σε μια μελέτη που έγινε σε ένα ορεινό δάσος οξιάς στο εθνικό πάρκο της Τοσκάνης-Αιμιλιανής Απενίνι στην Ιταλία, τα αποτελέσματα του ACI θα

μπορούσαν να επιτρέψουν τη σύγκριση της ακουστικής ταυτότητας των διαφορετικών κοινοτήτων και την άμεση κατανόηση της παρουσίας ορισμένων ειδών με πολύ συγκεκριμένη θέση τραγουδιού (*Farina, Pers. Comm.*). Στην έρευνα του εργαστηρίου της απομακρυσμένης περιβαλλοντικής αξιολόγησης του πανεπιστημίου του Μίσιγκαν των ΗΠΑ, βρέθηκε πως για κάποιες βιοφωνικές φωνητικές ενδείξεις μια χαμηλή τιμή NDSI μπορεί να υποδεικνύει την παρουσία ορισμένων ειδών ζώων. Για παράδειγμα, το παγοβούτι (*Gavia immer*) έχει μια κλήση χαμηλής συχνότητας που συχνά παράγει μια βαθμολογία NDSI μικρότερη από - 0,8. Σε μια έρευνα (*Elizabeth M. McDonald et al. 2017*) όπου καταγράφηκαν φωνητικές συμπεριφορές συγκεκριμένων φαλαινών φυσητήρων σε τρεις τοποθεσίες του Βόρειου Κόλπου του Μεξικού τον Ιούλιο του 2010 και του 2011, ο δείκτης της ακουστικής δραστηριότητας έδειξε σημαντικές διαφορές όσον αφορά τις αναλογίες κοινωνικής και τροφικής συμπεριφοράς σε ολόκληρη την περιοχή των φαλαινών φυσητήρες στον Βόρειο Κόλπο του Μεξικού και το ποσοστό της κοινωνικής δραστηριότητας αυξήθηκε κατά περισσότερο από δύο φορές από το 2010 έως το 2011. Σε μια άλλη έρευνα (*A. Gasc et al. 2012*) με προσομοιωμένες εγγραφές συγκροτημάτων πουλιών υπό διαφορετικές συνθήκες πεδίου, οι δείκτες ποικιλομορφίας ACI, NP, AR, M, H, H(t) & H(f) που εξετάστηκαν, ήταν ευαίσθητοι στην ταυτότητα των ειδών. Μάλιστα για ορισμένους δείκτες, όπως NP, AR και ACI, οι ακουστικές ιδιότητες ενός είδους μπορούν να μειώσουν τη συνολική αξία της ακουστικής ποικιλομορφίας ενός ενδιαίτηματος. Μεταξύ των δεικτών ακουστικής ποικιλομορφίας, η τιμή του Ht αυξήθηκε με την προσθήκη ενός νέου είδους και ήταν ο δείκτης από τους λιγότερο επηρεασμένους από την ταυτότητα των ειδών, επίσης Ht ήταν ο δείκτης που επηρεάστηκε λιγότερο από την ομοιομορφία των ειδών, που εδώ αντικατοπτρίζεται από το σχετικό πλάτος των τραγουδιών και επηρεάστηκε ελάχιστα από την επικάλυψη του τραγουδιού. Επομένως, ο Ht θα μπορούσε να αντανακλά καλύτερα την ποικιλία των ειδών σε σχέση με τους άλλους δείκτες.

3.8. Συσχέτιση των δεικτών με το τοπίο

Σε μια έρευνα που πραγματοποιήθηκε κατά μήκος μιας σειράς υποβαθμισμένων οικοσυστημάτων της Χαβάης, ο δείκτης της σχετικής αφθονίας των πτηνών ήταν σημαντικά υψηλότερος σε δασικές εκτάσεις που περιείχαν υψηλά καλύμματα και ψηλά δέντρα από ότι σε περιοχές σαβάνας και θάμνων με χαμηλότερο κάλυμμα και μικρότερα δέντρα. Σε μια άλλη έρευνα που έγινε σε δύο κοντινές παράκτιες δασικές περιοχές της Τανζανίας με έντονη ξηρασία οι τιμές H ήταν σημαντικά υψηλότερες για το παρθένο δάσος από ό, τι για το υποβαθμισμένο δάσος. Στην ίδια μελέτη ο δείκτης D υπογραμμίζει σαφώς τις διαφορές μεταξύ των δύο δασών και οδηγεί σε υψηλό επίπεδο την ακουστική ταξινόμησή τους. Σε μια μελέτη που οι ερευνητές χρησιμοποιούνε μεθόδους οικολογικής ακουστικής για την έρευνα των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στη βιοποικιλότητα, υπάρχουν φανερά στοιχεία (*Farina et al., 2015*) ότι η υψηλή αξία της αναλογίας χορωδιών ((Chorus Ratio (CR)) χαρακτηρίζει τα οικοσυστήματα που είναι φτωχά σε πόρους όπου τα πουλιά που πρέπει να ξοδεύουν ενέργεια

τραγουδώντας την αυγή χρειάζονται κάποιο χρόνο για να ανακτήσουν την χαμένη ενέργεια μειώνοντας την τραγουδιστική τους δραστηριότητα. Σε μια έρευνα όπου καταγράφηκαν φωνητικές συμπεριφορές συγκεκριμένων φαλαινών ψυσητήρων σε τρεις τοποθεσίες του Βόρειου Κόλπου του Μεξικού τον Ιούλιο του 2010 και του 2011, η κεντρική τοποθεσία είχε την υψηλότερη τιμή δείκτη ακουστικής δραστηριότητας και αυτό αντανάκλα ένα υψηλότερο ποσοστό του χρόνου που δαπανάται για κοινωνικοποίηση σε αυτή την περιοχή σε σχέση με τις άλλες δυο περιοχές. Σε μια έρευνα που πραγματοποιήθηκε σε δεκαεννέα δασικές τοποθεσίες στην ανατολική Αυστραλία, για την εκτίμηση του επιπέδου κατακερματισμού του τοπίου και της οικολογικής κατάστασης των περιοχών, οι τρεις δείκτες που συνδέουν καλύτερα το ηχητικό τοπίο με χαρακτηριστικά τοπίου ήταν η ακουστική εντροπία (H), η ακουστική ομοιότητα (AEI) και ο ομαλοποιημένος δείκτης ηχητικής απόκλισης (NDSI). Από αυτά τα αποτελέσματα, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι τα NDSI και H είναι αποτελεσματικοί δείκτες τοποθεσιών με μικρό μέγεθος διαστάσεων, που βρίσκονται κοντά σε κατοικημένες περιοχές και περιβάλλουν μεγάλο αριθμό δρόμων. Ομοίως, τα NDSI και H υποδεικνύουν τοποθεσίες με υψηλή οικολογική κατάσταση που δεν περιβάλλεται από οικιστική ανάπτυξη και έχουν ελάχιστη έκταση δρόμων, αλλά ποικίλλουν ευρέως σε μέγεθος έμπλαστρου. Αυτό υποδηλώνει ότι η απόκριση αυτών των ακουστικών μετρήσεων δεν περιορίζεται αυστηρά στο μέγεθος των επιπέδων αλλά μάλλον διαφοροποιεί τις τοποθεσίες παρόμοιου μεγέθους με διαφορετικά επίπεδα ακουστικού θορύβου που συνδέονται με την αστικοποίηση. Σε μια άλλη έρευνα Οι Farina et al. (2011) χρησιμοποίησαν τον δείκτη ακουστικής πολυπλοκότητας για να αναλύσει το ηχητικό τοπίο της ανατολικής Λιγουρίας στην Ιταλία, που κυριαρχείται από τη βλάστηση maqui, και διαπίστωσε ότι σχετίζεται με την παρουσία και τη δραστηριότητα των πτηνών - παρόλο που δεν αξιολογήθηκε ο ακριβής συσχετισμός.

3.9. Συσχέτιση των δεικτών με τη χρονική κατανομή της ακουστικής δραστηριότητας

Σε μια έρευνα που έγινε σε ημιτροπικές περιοχές της Αυστραλίας το 2010, βρέθηκε πως οι δείκτες H [t], H [s] και ACI αντικατοπτρίζουν τη χρονική κατανομή της ακουστικής ενέργειας στη θέση. Στην ίδια μελέτη βρέθηκε πως καλύτερος δείκτης, όσον αφορά τη συνέπεια που έδειξε σε μετρήσεις πολλαπλών ημερών, ήταν ο H [v]. Σε μια άλλη έρευνα με προσομοιωμένες εγγραφές συγκροτημάτων πουλιών υπό διαφορετικές συνθήκες πεδίου, από τους δείκτες ποικιλομορφίας ((ACI, NP, AR, M, H, H(t) & H(f)) που εξετάστηκαν, οι δείκτες NP και AR είναι οι λιγότερο επηρεασμένοι δείκτες από τη χρονική αλληλεπικάλυψη των τραγουδιών. Σε μια άλλη έρευνα που έγινε σε δύο κοντινές παράκτιες δασικές περιοχές της Τανζανίας με έντονη ξηρασία οι τιμές του H αυξήθηκαν με μικρή διακύμανση από την αυγή μέχρι το σούρουπο στο παρθένο δάσος αλλά όχι στο υποβαθμισμένο δάσος. Στην ίδια έρευνα ο δείκτης D αποκαλύπτει επίσης σημαντικές διαφορές μεταξύ των τριών περιόδων της ημέρας για το παρθένο δάσος. Σε μια έρευνα που πραγματοποιήθηκε σε επτά τοποθεσίες της Κομητείας Τιπεκανόε στην Ιντιάνα

των ΗΠΑ η ακουστική ποικιλομορφία, που μετρήθηκε με τον δείκτη Shannon, δείχνει ότι πέντε από τις επτά τοποθεσίες έρευνας (Martell, Ross, FNR Farm, Wildlife και McCormick) έχουν υψηλές τιμές ποικιλίας κατά τις πρωινές και βραδινές περιόδους που συμπίπτουν με την χορωδία της αυγής και του σούρουπου. Σχεδόν όλες αυτές οι τοποθεσίες έχουν επίσης μια περίοδο πριν από την χορωδία αυγής που εμφανίζεται να παρουσιάζει "ανάπαυση" μετά από μια σχετικά διαφορετική σειρά ήχων που συμβαίνουν τη νύχτα. Η ποικιλία των ήχων κατά τη διάρκεια της νύχτας είναι τόσο μεγάλη όσο αυτές κατά τη διάρκεια της χορωδίας την αυγή. Οι δύο αγροτικές τοποθεσίες (FNR Farm και McCormick) αντανακλούν την «επένδυση» της ακουστικής ποικιλομορφίας καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας, με σχεδόν μηδαμινές κορυφές της χορωδίας του σούρουπου και της αυγής σε ακουστική ποικιλομορφία που συμβαίνει σε οποιαδήποτε από αυτές τις θέσεις. Σε μια μελέτη που οι ερευνητές χρησιμοποιούν μεθόδους οικολογικής ακουστικής για την έρευνα των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στη βιοποικιλότητα, βρέθηκε πως μια υψηλή τιμή της αναλογίας χορωδιών (CR), υποδηλώνει την επικρατούσα δραστηριότητα στην χορωδία της αυγής και τη μέτρια ακουστική δραστηριότητα μετά από αυτή την περίοδο. Στην έρευνα που περιγράφει τη χωρική και χρονική διακύμανση της δομής και της σύνθεσης της κοινότητας πτηνών στη Γαλλία από το 2001, τα αποτελέσματά υποδεικνύουν ότι η σεξουαλική επιλογή διαφόρων ειδών πτηνών βασίζεται σε χρονικά χαρακτηριστικά του τραγουδιού των αρσενικών (*Catchpole and Slater, 1995 για ανασκόπηση*). Ειδικά αποδείχθηκε ότι ο ρυθμός του τραγουδιού των αρσενικών συνδέεται με την αναπαραγωγική επιτυχία και την ποιότητα της περιοχής (*Alatalo et al., 1990, Greig-Smith, 1982*). Σε μια έρευνα όπου καταγράφηκαν φωνητικές συμπεριφορές συγκεκριμένων φαλαινών φυσητήρων σε τρεις τοποθεσίες του Βόρειου Κόλπου του Μεξικού τον Ιούλιο του 2010 και του 2011, κατά τη διάρκεια των ετών, ο δείκτης ακουστικής δραστηριότητας των φαλαινών φυσητήρων διέφερε σημαντικά και στις τρεις τοποθεσίες της έρευνας. Μια έρευνα που πραγματοποιήθηκε σε δεκαεννέα δασικές τοποθεσίες στην ανατολική Αυστραλία, για την εκτίμηση του επιπέδου κατακερματισμού του τοπίου και της οικολογικής κατάστασης των περιοχών, υποδεικνύει ότι οι δείκτες H & ADI είναι ευαίσθητοι στις νυχτερινές βιοακουστικές μετρήσεις. για παράδειγμα τα έντομα, τα οποία είναι άφθονα τη νύχτα σε ζεστά, υποτροπικά περιβάλλοντα.

3.10. Συσχέτιση των δεικτών με τη φασματική κατανομή της ακουστικής δραστηριότητας

Σε μια έρευνα που έγινε σε ημιτροπικές περιοχές της Αυστραλίας το 2010, βρέθηκε πως οι δείκτες H [t], H [s] και ACI αντικατοπτρίζουν τη φασματική κατανομή της ακουστικής ενέργειας στη θέση. Στην έρευνα που περιγράφει τη χωρική και χρονική διακύμανση της δομής και της σύνθεσης της κοινότητας πτηνών στη Γαλλία από το 2001, τα αποτελέσματά υποδεικνύουν ότι οι φασματικές πληροφορίες μπορεί να επαρκούν για να αντανακλούν τη φυλογενετική ποικιλομορφία, ακόμη και αν η διαχρονική διακύμανση συμμετέχει στις διαδικασίες ποικιλομορφίας και κωδικοποίησης των

τραγουδιών πουλιών (*Catchpole and Slater, 1995 για ανασκόπηση*). Στην ίδια έρευνα η ποικιλία των συχνοτήτων που υποστηρίζει η Df, σχετίζεται με την ποικιλομορφία στην αναπαραγωγή. Σε μια έρευνα που πραγματοποιήθηκε σε δεκαεννέα δασικές τοποθεσίες στην ανατολική Αυστραλία, για την εκτίμηση του επιπέδου κατακερματισμού του τοπίου και της οικολογικής κατάστασης των περιοχών βρέθηκε πως οι μετρήσεις ACI και BIO υπολογίζονται με βάση τη μεταβολή στο φασματικό πλάτος (ή την ένταση του σήματος), αν και ο δείκτης BIO δεν λαμβάνει υπόψη τους ήχους στην εμβέλεια της ανθρωποφωνίας (0-2 kHz), ενώ ο ACI τους λαμβάνει υπόψη. Σε μια άλλη έρευνα που έγινε σε δύο περιοχές της επαρχίας Yunnan της νότιας Κίνας (*Machado et al. 2017*) έχει αναφερθεί ότι ο δείκτης AR σχεδιάστηκε για περιβάλλοντα με χαμηλή ποικιλία ειδών και χαμηλές αναλογίες σήματος προς θόρυβο. Αντίθετα, οι περιοχές μας είναι πολύ διαφορετικές και παρόλο που υπήρξαν μερικές περιπτώσεις υψηλών ανθρωπογενών θορύβων, ο λόγος σήματος προς θόρυβο στις καταγραφές μας είναι πιθανότατα υψηλότερος από ό, τι σε εύκρατες περιοχές με υψηλή ανθρώπινη παρουσία.

3.11. Συσχέτιση των δεικτών με τις κλιματολογικές συνθήκες

Σε μια έρευνα που έγινε στο Περιφερειακό Πάρκο της Haute-Vallée de Chevreuse στη Γαλλία, η ηλιακή ακτινοβολία και η μέγιστη θερμοκρασία επηρέασαν τις διακυμάνσεις του δείκτη D. Σε μια μελέτη που οι ερευνητές χρησιμοποιούνε μεθόδους οικολογικής ακουστικής για την έρευνα των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στη βιοποικιλότητα, βρέθηκε πως κατά τη διάρκεια μικρών και μεσαίων περιόδων, η αναλογία χρωδίων (CR) πιθανόν να δείχνει διακυμάνσεις στη διαθεσιμότητα πόρων σύμφωνα με την επίδραση της εποχικότητας (πιο υγρή, πιο ξηρή, πολύ ζεστή, πολύ κρύα , κ.λ.π.).

3.12. Συσχέτιση των δεικτών με την απόσταση από τα μικρόφωνα εγγραφής

Σε μια μελέτη που έγινε σε ένα ορεινό δάσος οξιάς στο εθνικό πάρκο της Τοσκάνης-Αιμιλιανής Απενίνι στην Ιταλία, ο ακουστικός δείκτης ACI υπολογίζει τη σχετική ένταση [το άθροισμα όλων των τιμών dk (διαφορές στις εντάσεις) διαιρείται για το συνολικό άθροισμα των εντάσεων], μειώνοντας τη μεταβλητότητα που εισάγουν οι οργανισμοί που κελαηδούν σε διαφορετικές αποστάσεις από τα μικρόφωνα εγγραφής.

Κριτήρια επιλογής ενός ακουστικού δείκτη	NP	ACI	NDSI	ADI	AR	H	Hf	Ht	Dt	Δείκτης ακουστικής δραστηριότητας
Συσχέτιση των δεικτών με το θόρυβο του περιβάλλοντος (υποβάθρου)	x (Γεωφωνία), v (Βιοφωνία)	x (σε τυχαίο θόρυβο και στη Γεωφωνία), v (σε συνεχή θόρυβο)	v (0 - 12 kHz), x (Ανθρωποφωνία - υψηλή ένταση θορύβου)	x	v (Βιοφωνία), x (Γεωφωνία)	x	x	v		
Το εύρος σήματος του ακουστικού δείκτη	v	v			x			v		
Συσχέτιση των δεικτών με τον πλούτο των ειδών	v	v	v	x	v	v				
H αλληλεπίδραση των δεικτών		v (AR, BIO)	v	v (H, AEI)	v (ACI)	v (ADI, AEI)			v (Df, KS, KL, D)	
Συσχέτιση των δεικτών με τη ακουστική δραστηριότητα	v	v (0 - 12 kHz, Βιοφωνία, ανθρωποφωνία, γεωφωνία)	v (0 - 12 kHz, Βιοφωνία, γεωφωνία)	v (Γεωφωνία), x (Ανθρωποφωνία, Βιοφωνία)						
Συσχέτιση των δεικτών με την ακουστική ετερογένεια		v (βιοφωνική & γεωφωνική ετερογένεια), x (ανθρωποφωνική ετερογένεια), x (12 - 96 kHz)	v (βιοφωνική & βιοφωνική ετερογένεια), x (ανθρωποφωνική ετερογένεια)	v (γεωφωνική ετερογένεια), x (ανθρωποφωνική και βιοφωνική ετερογένεια)	v	v	x	x		
Συσχέτιση των δεικτών με τη ταυτότητα των ειδών	v	v	v		v	v	v	x		
Συσχέτιση των δεικτών με το τοπίο			v			v				
Συσχέτιση των δεικτών με τη χρονική κατανομή της ακουστικής δραστηριότητας	x	v		v	x	v		v		v
Συσχέτιση των δεικτών με τη φασματική κατανομή της ακουστικής δραστηριότητας		v			v			v		
Συσχέτιση των δεικτών με τις κλιματολογικές συνθήκες										
Συσχέτιση των δεικτών με την απόσταση από τα μικρόφωνα εγγραφής		x								

Πίνακας 3(α). Κριτήρια επιλογής ενός ακουστικού δείκτη. Με v είναι τα κριτηρία που ικανοποιούνται από τον δείκτη, ενώ με x τα κριτηρία δεν ικανοποιούνται.

Κριτήρια επιλογής ενός ακουστικού δείκτη	M	Hs	Dcf	Hv	Df	AEI	BIO	Ακουστική ποικιλότητα	Σχετική αφθονία των πτηνών	Δείκτης Shannon	KS	KL	D	Δείκτης Simpson	Φασματική Ποικιλότητα	B
Συσχέτιση των δεικτών με το θόρυβο του περιβάλλοντος (υποβάθρου)	x														v	X
Το εύρος σήματος του ακουστικού δείκτη	x	v	v													
Συσχέτιση των δεικτών με τον πλούτο των ειδών				v	v	v	x									
H αλληλεπίδραση των δεικτών			x		v (Dt, D, KS, KL)	v (ADI, H)	v (ACI)	v (σχετική αφθονία, Shannon)	v (ακουστική ποικιλότητα, Shannon)	v (σχετική αφθονία, ακουστική ποικιλότητα)	v (Dt, Dt, D, KL)	v (Dt, Dt, D, KS)	v (Df, Dt, KS, KL)	v (ACI)	v	
Συσχέτιση των δεικτών με τη ακουστική δραστηριότητα																v (0 - 12 kHz, Βιοφωνία, ανθρωποφωνία)
Συσχέτιση των δεικτών με την ακουστική ετερογένεια						v	v			x			v			v (βιοφωνική, γεωφωνική & ανθρωποφωνική ετερογένεια)
Συσχέτιση των δεικτών με τη ταυτότητα των ειδών	v													v		
Συσχέτιση των δεικτών με το τοπίο						v		v	v				v	v		
Συσχέτιση των δεικτών με τη χρονική κατανομή της ακουστικής δραστηριότητας	v			v						v			v			
Συσχέτιση των δεικτών με τη φασματική κατανομή της ακουστικής δραστηριότητας		v			v		v									
Συσχέτιση των δεικτών με τις κλιματολογικές συνθήκες													v			
Συσχέτιση των δεικτών με την απόσταση από τα μικρόφωνα εγγραφής																

Πίνακας 3(β). Κριτήρια επιλογής ενός ακουστικού δείκτη. Με v είναι τα κριτήρια που ικανοποιούνται από τον δείκτη, ενώ με x τα κριτήρια δεν ικανοποιούνται.

4. ΕΝΤΡΟΠΙΑ

Η έννοια της εντροπίας προτάθηκε το 1850 από το Γερμανό φυσικό Rudolf Clausius στο πλαίσιο των μελετών του για τη θερμοδυναμική. Ο Clausius σχημάτισε τον όρο από ελληνικές λέξεις "εν" και "τροπή" (με την έννοια της μετατροπής). Εισήγαγε τη λέξη "entropie" κατά αντιστοιχία με τη λέξη "energie" θέλοντας να περιγράψει αυτό που θεωρούσε ότι είναι "εκφυλισμός" της ενέργειας κατά τη διαδικασία της μετατροπής της. Αρχικά η εντροπία εισήχθη στη θερμοδυναμική, ο Clausius έχοντας ο ίδιος ασχοληθεί με τις μηχανές εσωτερικής καύσης, τις διατύπωσε σε νόμους. Οι απόψεις του περί εντροπίας εκφράστηκαν στον δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο.

Ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος ήταν γνωστός εκ των προτέρων και είναι ο νόμος που λέει ότι η συνολική ποσότητα της ενέργειας σε ένα κλειστό σύστημα παραμένει σταθερή, ανεξάρτητα από τις μετατροπές τις οποίες υφίσταται η ενέργεια μέσα σε αυτό. Πρόκειται για ένα νόμο που είναι γνωστός και ως "αρχή διατήρησης της ενέργειας", και θεωρούμε ότι έχει καθολική ισχύ στο σύμπαν. Ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος, η σημαντικότερη συνεισφορά του Clausius στην επιστήμη, λέει ότι η ποσότητα της εντροπίας σε ένα κλειστό σύστημα όπου λαμβάνουν χώρα μετατροπές ενεργείας, πάντα αυξάνεται, ή το πολύ-πολύ μένει σταθερή, δεν μειώνεται ποτέ. Πρόκειται επίσης για ένα νόμο που θεωρούμε ότι έχει καθολική ισχύ στο σύμπαν.

Ορισμός: Η μεταβολή της εντροπίας (ΔS) συστήματος κατά τη διάρκεια μιας πολύ μικρής αντιστρεπτής μεταβολής τόσο μικρής ώστε η θερμοκρασία του συστήματος να μπορεί να θεωρηθεί σταθερή, ονομάζεται το πηλίκο του ποσού της θερμότητας ΔQ που απορρόφησε ή απέβαλε το σύστημα προς τη θερμοκρασία του συστήματος.

$$\Delta S = \Delta Q / T$$

Η εντροπία στην ακουστική εισήχθη με τη "θεωρία της πληροφορίας", που ήταν πνευματικό παιδί του Claude Shannon, και είναι καρπός των μελετών του γύρω από τα γενικά επικοινωνιακά συστήματα. Όπως τη συνέλαβε ο Shannon, η πληροφορία είναι ένα μέγεθος που χαρακτηρίζει ένα σήμα (ή, γενικότερα ένα σύστημα) και αντικατοπτρίζει την ποσότητα των διακριτών καταστάσεων, στις οποίες μπορεί να βρεθεί το σήμα (ή το σύστημα) αυτό. Επικοινωνία επιτυγχάνεται όταν η πληροφορία μπορεί να μεταδοθεί από έναν πομπό μέσω ενός καναλιού προς ένα δέκτη, και να γίνει αντιληπτή από εκείνον. Στην πραγματικότητα αυτό το οποίο εκπέμπεται από τον πομπό, μεταβιβάζεται μέσω του καναλιού και αναδημιουργείται από τον δέκτη δεν είναι παρά μια αλληλουχία διακριτών καταστάσεων. Το "επικοινωνιακό κύκλωμα" (πομπός, κανάλι, δέκτης) έχει μια συγκεκριμένη πληροφοριακή χωρητικότητα, μπορεί δηλαδή να περιέλθει σε μία από ένα πεπερασμένο σύνολο πιθανών διακριτών καταστάσεων. Ο πομπός πρέπει να μπορεί να θέσει το σύστημα σε κάποια από αυτές τις καταστάσεις, το κανάλι να την αναμεταδώσει προς το δέκτη και ο δέκτης να τη διακρίνει από όλες τις πιθανές καταστάσεις.

Τα προβλήματα αρχίζουν όταν στο επικοινωνιακό κύκλωμα παρεισφρέει θόρυβος. Ο θόρυβος επηρεάζει την επικοινωνία γιατί, όντας τυχαίος και απρόβλεπτος, ουσιαστικά "θολώνει" τα όρια μεταξύ των καταστάσεων στις οποίες περιέρχεται το σύστημα, τα όρια αυτά γίνονται τόσο πιο δυσδιάκριτα όσο μεγαλύτερος είναι ο θόρυβος. Ο πομπός θα κάνει ό,τι καλύτερο μπορεί για να προσδιορίσει την κατάσταση που πρέπει να έχει το κανάλι ανά χρονική στιγμή, αλλά ο δέκτης θα μπερδευτεί και δεν θα ξέρει τι ακριβώς έχει λάβει. Το τι ακριβώς θεωρείται θόρυβος εξαρτάται από το πώς είναι υλοποιημένο το επικοινωνιακό σύστημα. Δεν είναι δύσκολο να δει κανείς, όμως, ότι γενικώς η πληροφορική χωρητικότητα ενός συστήματος είναι μεγαλύτερη όσο πιο "τακτικό" είναι το σύστημα αυτό, και αντιστοίχως ότι όσο αυξάνεται η αταξία του συστήματος τόσο μειώνεται η πληροφορία του. Με άλλα λόγια, θα μπορούσαμε να πούμε ότι η πληροφορία του συστήματος αποτελεί μέτρο της εσωτερικής του τάξης. Αυτό αποδεικνύεται και μαθηματικά: η πληροφοριακή χωρητικότητα ενός συστήματος είναι αντίστροφο μέγεθος της ποσότητας εντροπίας του ίδιου συστήματος. Η εντροπία αντιστοιχεί με το θόρυβο.

5. ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΙΩΣΗΣ ΘΟΡΥΒΟΥ ΥΠΟΒΑΘΡΟΥ

Όπως είδαμε πιο πάνω μερικοί από τους δείκτες είναι ευαίσθητοι στον περιβαλλοντικό θόρυβο που προκαλούν τα μοναδικά χαρακτηριστικά του τοπίου και η παρουσία ανθρωπογενούς θορύβου (*Fuller, S., Axel, A. C., Tucker, D. & Gage, S. H., 2015*). Συνεπώς, η αβεβαιότητα αυξάνεται όταν οι ακουστικοί δείκτες χρησιμοποιούνται για τη διερεύνηση των χωρικών και χρονικών αλλαγών στη βιοποικιλότητα σε θορυβώδη περιβάλλοντα. Η αβεβαιότητα των δεικτών σε θορυβώδη περιβάλλοντα μπορεί να μειωθεί εάν ο θόρυβος μπορεί αποτελεσματικά να κατασταλεί πριν την ακουστική ανάλυση. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι μείωσης θορύβου ((Noise Reduse (NR)) στον τομέα της επεξεργασίας και ανάλυσης ακουστικών σημάτων.

Μεταξύ των μεθόδων NR, μια αξιοσημείωτη τάξη είναι οι μέθοδοι της φασματικής αποκατάστασης. Ο στόχος των μεθόδων φασματικής αποκατάστασης είναι να διαχωριστούν τα σήματα χωρίς θόρυβο από τα καταγεγραμμένα θορυβώδη σε φασματική περιοχή. Οι πολύ γνωστές προσεγγίσεις φασματικής αποκατάστασης περιλαμβάνουν τη φασματική αφαίρεση (Spectral Subtraction(SS)) (*Boll, S. F., 1979*) και το φίλτρο Wiener (*Scalart, P. & Filho, J. V., 1996*) με τις διάφορες επεκτάσεις τους (*Lu, Y. & Loizou, P. C., 2008, Li, J., Sakamoto, S., Hongo, S., Akagi, M. & Suzuki, Y., 2011*). Μια άλλη ομάδα φασματικών μεθόδων αποκατάστασης βασίζεται στα στατιστικά μοντέλα χωρίς σήματα θορύβου και στα σήματα που έχουν υποστεί φθορά θορύβου, η οποία χρησιμοποιείται για να φιλτράρει τα σήματα εισόδου που έχουν αλλοιωθεί από θόρυβο για να αποκτήσουν τα αντίστοιχα σήματα χωρίς θόρυβο. Σημαντικά παραδείγματα περιλαμβάνουν τον εκτιμητή φάσματος ελάχιστου μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Minimum Mean Square

Error (MMSE)) (Hansen, J. H. L., Radhakrishnan, V. & Arehart, K. H., 2006), τον εκτιμητή φασματικού εύρους μέγιστης πιθανότητας (Maximum Likelihood Spectral Amplitude (MLSA)) (McAulay, R. J. & Malpass, M. L., 1980), το μέγιστο εκ των υστέρων φασματικό εύρος (Maximum A Posteriori spectral Amplitude (MAPA)) (Plourde, E. & Champagne, B., 2008) και το εκ των υστέρων μέγιστο γενικευμένο φασματικό πλάτος (Generalized Maximum A Posteriori spectral Amplitude (GMAPA)) (Tsao, Y. & Lai, Y.H., 2016).

Οι φασματικές μέθοδοι αποκατάστασης συνήθως βασίζονται σε ένα σύστημα παρακολούθησης θορύβου για τον υπολογισμό των στατιστικών στοιχείων του θορύβου. Τα αποτελεσματικά συστήματα παρακολούθησης θορύβου περιλαμβάνουν την παρακολούθηση ελάχιστων στατιστικών στοιχείων (Minimum Statistics (MS)) (Martin, R., 2001), τον ελεγχόμενο ελάχιστο επαναλαμβανόμενο μέσο όρο (Minima Controlled Recursive Averaging MCRA) (Cohen, I. & Berdugo, B., 2002) και τον βελτιωμένο ελεγχόμενο ελάχιστο επαναλαμβανόμενο μέσο όρο MCRA (Improved Minima Controlled Recursive Averaging (IMCRA)) (Cohen, I., 2004). Η προετοιμασία των δεδομένων κατάρτισης αποτελεί σημαντικό θέμα της μακροπρόθεσμης και μεγάλης κλίμακας ακουστικής παρακολούθησης της βιοποικιλότητας, διότι είναι πολύ δύσκολο να συλλεχθούν επαρκή δεδομένα κατάρτισης με καλή ποιότητα εγγραφής. Οι μη εποπτευόμενες προσεγγίσεις φασματικής αποκατάστασης, όπως οι μέθοδοι φασματικής αποκατάστασης MPSA, MAPA και GMAPA, εκτιμούν τη συνάρτηση κέρδους στον φασματικό τομέα με βάση τα μοντέλα κατανομής πιθανοτήτων του ακουστικού σήματος και του θορύβου (Hansen, J. H. L., Radhakrishnan, V. & Arehart, K. H., 2006, Plourde, E. & Champagne, B., 2008, Tsao, Y. & Lai, Y.-H., 2016). Ωστόσο, οι φασματικές μέθοδοι αποκατάστασης δεν μπορούν να εντοπίσουν διαφορετικούς τύπους θορύβου σε μακροπρόθεσμες καταγραφές πεδίων. Στις ηχογραφήσεις, τόσο οι περιβαλλοντικοί όσο και οι ανθρωπογενείς θόρυβοι είναι συνήθως μεταβαλλόμενοι. Ως εκ τούτου, οι συμβατικές μέθοδοι φασματικής αποκατάστασης ενδέχεται να μην επαρκούν για τη βελτίωση των επιδόσεων των ακουστικών δεικτών. Αν και οι συμβατικές μέθοδοι φασματικής αποκατάστασης μπορούν να παρέχουν ικανοποιητικές επιδόσεις υπό τις περισσότερες συνθήκες, υπάρχει ακόμη περιθώριο για περαιτέρω βελτίωση τους για μη στάσιμες θορυβώδεις συνθήκες. Παρόλο που είναι αποτελεσματικά στη μείωση του στατικού θορύβου, δεν είναι σε θέση να χειριστούν το μεταβατικό θόρυβο που προκαλούν τα καιρικά φαινόμενα και οι ανθρώπινες δραστηριότητες.

Πιο πρόσφατα, έχει υιοθετηθεί ο μη αρνητικός αλγόριθμος παραγοντοποίησης μωσαϊκού (non-Negative Matrix Factorization (NMF)) για τη μείωση του θορύβου και παρουσιάζει ελπιδοφόρες επιδόσεις στον χειρισμό των μεταβαλλόμενων θορύβων (Smaragdīs, P., Fevotte, C., Mysore, G. J., Mohammadiha, N. & Hoffman, M., 2014). Το NMF χρησιμοποιήθηκε για να μοντελοποιήσει τις κωδικοποιημένες πληροφορίες ενός ακουστικού σήματος και θορύβου σε μια θορυβώδη καταγραφή. Με τη μοντελοποίηση των χαρακτηριστικών που σχετίζονται με το σήμα και τη μήτρα κωδικοποίησης, το ακουστικό σήμα μπορεί να διαχωριστεί ή να ενισχυθεί από τις θορυβώδεις εγγραφές (Fan, H.-T., Hung, J., Lu, X., Wang, S.-S. & Tsao, Y., 2014). Παρόλο που το NMF επιτυγχάνει ικανοποιητικές επιδόσεις σε πολλές εργασίες

ακουστικής μείωσης θορύβου, ένας σημαντικός περιορισμός στην εφαρμογή του είναι ότι πρέπει να συλλεχθούν καθαρές πηγές σήματος στην φάση εκτός σύνδεσης για να διευκολυνθεί η αποτελεσματική μείωση του θορύβου στην ηλεκτρονική φάση. Ωστόσο, σε πραγματικές συνθήκες, η συλλογή καθαρών σημάτων μπορεί να μην είναι πάντα δυνατή. Επομένως, η παραδοσιακή εποπτευόμενη μέθοδος NMF δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατάλληλα στην παθητική ακουστική παρακολούθηση της βιοποικιλότητας.

Σε μια μελέτη που έγινε το 2017 από τους Tzu-Hao Lin, Shih-Hua Fang & Yu Tsao στα πλαίσια του project "Διερεύνηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ οικολογικού περιβάλλοντος, άγριας πανίδας και ανθρώπινων δραστηριοτήτων με τη χρήση πληροφοριών ηχοτοπίου" του υπουργείου επιστημών και τεχνολογίας της Κίνας, για να αντιμετωπιστούν οι περιορισμοί των συμβατικών εποπτευόμενων μεθόδων μείωσης θορύβου NMF παρουσιάστηκε ένα νέο NMF με ανάλυση περιοδικότητας (Periodicity Analysis (PC-NMF)) για την καταστολή των θορύβων από φασματογραφήματα εγγραφών μακράς διάρκειας με ανεξέλεγκτο τρόπο. Με βάση την περιοδικότητα των κωδικοποιημένων πληροφοριών, το PC-NMF μπορεί να διαχωρίσει πολλαπλές βιολογικές χορωδίες και να καταστείλει τα σήματα θορύβου. Το PC-NMF λειτουργεί ως ένας αυτόματος αλγόριθμος απονέωσης, ο οποίος βελτιώνει τη διερεύνηση της εμφάνισης των φωνητικών ζώων και τις αλλαγές στην διάρθρωση των φωνητικών ζώων σε εγγραφές μακράς διάρκειας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η απόδοση του PC-NMF δεν ήταν τόσο ισχυρή όσο αυτή του εποπτευόμενου NMF, εντούτις το PC-NMF εξακολουθούσε να παρέχει μια λύση για την ενίσχυση των βιολογικών χορωδιών χωρίς δεδομένα κατάρτισης. Τα κύρια πλεονεκτήματα του PC-NMF είναι δυο. Το πρώτο πλεονέκτημα είναι η ικανότητα, που του επιτρέπει να αποσυνθέτει ένα φασματογράφημα σε μια μήτρα βάσης και μια μήτρα κωδικοποίησης. Ο πίνακας κωδικοποίησης παρέχει προκαταρκτικές πληροφορίες σχετικά με τη χρονική αλλαγή κάθε πηγής ήχου, έτσι ώστε το δεύτερο NMF να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ομαδοποίηση διαφορετικών βάσεων. Το δεύτερο πλεονέκτημα είναι ότι το PC-NMF μπορεί να παρέχει μη ομαδοποιημένη συσσωμάτωση της βασικής μήτρας σύμφωνα με την περιοδικότητα που μετράται από τη μήτρα κωδικοποίησης. Λόγω της πολυπλοκότητας των φωνητικών των ζώων, διαφορετικοί βιολογικοί ήχοι μπορεί να παρουσιάζουν ποικίλα φασματικά χαρακτηριστικά, αλλά οι περισσότεροι από τους βιολογικούς ήχους συμβαίνουν με ένα περιοδικό σχέδιο. Επομένως, η περιοδικότητα που μετράται από τη μήτρα κωδικοποίησης μπορεί να βοηθήσει στη διαφοροποίηση του εάν μια βάση ανήκει στη βιολογική χορωδία με εμφανή ημερήσια συμπεριφορά ή την άλλη πηγή θορύβου χωρίς παρόμοιο πρότυπο εμφάνισης.

Οι παρατηρήσεις της μελέτης των Tzu-Hao Lin, Shih-Hua Fang & Yu Tsao δείχνουν ότι το PC-NMF μπορεί να μην αποδίδει καλά όταν η περιοδικότητα των βιολογικών ήχων στα δεδομένα δοκιμών δεν είναι πολύ εμφανής. Η περιοδικότητα μπορεί να μειώνεται όταν ένας βιολογικός ήχος δεν καταγράφεται καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Αφού μειωθεί η περιοδικότητα, η μη ομαδοποιημένη συσσωρευση της βασικής μήτρας μπορεί να μην είναι ακριβής, μειώνοντας έτσι την ικανότητα NR του PC-NMF. Ως εκ τούτου, συνιστάται η πρώτη χρήση του PC-NMF για ένα σύντομο θραύσμα

φασματογραφίας με μια εξέχουσα βιολογική χορωδία για να αποκτηθεί με βεβαιότητα ο βασικός πίνακας για βιολογικά και μη βιολογικά σήματα. Η μήτρα κωδικοποίησης ολόκληρου του συνόλου δεδομένων μπορεί στη συνέχεια να αναλυθεί χρησιμοποιώντας η συνδυασμένη μήτρα βάσης που συλλέχθηκε από διαφορετικά θραύσματα φασματογράφων. Τέλος, η βιολογική χορωδία σε ένα μακροπρόθεσμο σύνολο δεδομένων μπορεί να ανασυσταθεί χρησιμοποιώντας την εποπτευόμενη προσέγγιση NMF. Το PC-NMF μπορεί να αναθεωρηθεί ώστε να μπορεί να αναγνωρίζει μεμονωμένες πηγές ήχου. Για να επιτευχθεί αυτό, πρέπει να χρησιμοποιηθούν περισσότερα χαρακτηριστικά, όπως το φασματικό χαρακτηριστικό και η φασματική διαφοροποίηση, στη συσσωμάτωση χωρίς εποπτεία.

Συμπεράσματα

Μια ακατέργαστη ανθρωπογενής προοπτική (το κόστος / οφέλη, η ενέργεια, το εμπόριο και ο έλεγχος των πόρων) συνδυάζεται με μια αυθεντικότερη ανησυχία για την κατάσταση της Γης σε μια περίοδο κατά την οποία η ανθρωπότητα έχει φτάσει σε ένα τέτοιο επίπεδο οικολογικής εισβολής που το βραβείο Νόμπελ, το οποίο απονεμήθηκε στον Paul Crutzen και το συνάδελφό του Eugene Stoermer, εφάρμοσε τον όρο Ανθρωπόκαινο ή Ανθρωποκαινική εποχή για να διακρίνει τη σημερινή γεωλογική εποχή (*Crutzen and Stoermer, 2000*). Οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες είναι, ως επί το πλείστον, υπαίτιες για την κλιματική αλλαγή και ως εκ τούτου, οι προκλήσεις που καλούνται να αντιμετωπίσουν καθημερινά οι επιστήμονες της οικολογίας, σε θέματα όπως ο κατακερματισμός των ενδιαιτημάτων, οι εξαφανίσεις σπάνιων ειδών, η ραγδαία αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη και οι καταστρεπτικές συνέπειες από το φαινόμενο του θερμοκηπίου, οδηγούν την επιστημονική κοινότητα στην ανάγκη εξεύρεσης νέων καινοτόμων εργαλείων στην εκτίμηση και αξιολόγηση της βιοποικιλότητας.

Η εύρεση της κατάλληλης μεθοδολογίας για να εκτιμηθεί ποσοτικά η βιοποικιλότητα παραμένει άλυτο πρόβλημα. Υπάρχουν πάρα πολλές διαφορετικές μέθοδοι μέτρησης της βιοποικιλότητας οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε διαφορετικά αποτελέσματα άρα και συμπεράσματα (*Maddox, 1994*). Είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζει κανείς εκ των προτέρων, ποια διάσταση της βιοποικιλότητας πρόκειται να ερευνηθεί, διότι –εκτός των άλλων– τούτο παίζει σημαντικό ρόλο και στον σχεδιασμό της δειγματοληψίας. Δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να επιλέγεται κάποιος δείκτης για την εκτίμηση της βιοποικιλότητας μόνο και μόνο επειδή παράγει ελκυστικά αποτελέσματα (*Magurran, 2004*).

Από το 1950 μέχρι και σήμερα η εκτίμηση της ποικιλότητας, της αφθονίας και του πλούτου των ειδών ενός ενδιαιτήματος πραγματοποιείται με τους κλασικούς δείκτες βιοποικιλότητας, όπου οι επιστήμονες βγάζουν τα συμπεράσματα τους, βάση των καταγραφών τους στο πεδίο, μέσω της

παρατήρησης, της άμεσης συλλογής ή της παγίδευσης. Μια διαδικασία με περιορισμένη χωρική κατανομή της έρευνας, που είναι χρονοβόρα με μεγάλα κόστη και αυξημένη πιθανότητα σφάλματος στα αποτελέσματα των μετρήσεων. Οι πιο σημαντικοί από τους κλασικούς δείκτες ποικιλότητας, που παρουσιάζουμε σε αυτή την εργασία, είναι ο δείκτης Shannon και ο δείκτης Simpson. Για μία πλήρως ισομερή βιοκοινότητα, όπου όλα τα είδη εκπροσωπούνται με ίσο αριθμό ατόμων, ο δείκτης Shannon παίρνει τη μέγιστη τιμή. Για δύο πλήρως ισομερείς βιοκοινότητες, μεγαλύτερο δείκτη Shannon παρουσιάζει εκείνη με το μεγαλύτερο αριθμό ειδών. Ο δείκτης Shannon δίνει μεγαλύτερο βάρος στα σπάνια είδη απ' ό,τι ο δείκτης Simpson. Μειονέκτημα του δείκτη είναι ότι μετράει την ποικιλότητα και την ισομέρεια ενός πληθυσμού με ένα αριθμό. Ο δείκτης του Simpson ποσοτικοποιεί την ιδιότητα της κυριαρχίας και επηρεάζεται από τον αριθμό των ειδών αλλά και από την κατανομή των ατόμων στα είδη. Ο δείκτης του Simpson είναι ένας από τους πιο σημαντικούς και αξιόπιστους δείκτες ποικιλότητας που υπάρχουν. Στην ουσία εκφράζει την διακύμανση στην κατανομή της αφθονίας των ειδών (*Magurran, 2004*).

Στις μέρες μας υπάρχει ραγδαία ανάπτυξη ψηφιακών αυτόνομων καταγραφικών ηχοσυστημάτων που μπορούν να συλλέξουν με αυτόνομο τρόπο την ακουστική δραστηριότητα που προέρχεται από χερσαία, θαλάσσια και υδάτινα περιβάλλοντα. Αν και οι έρευνες, μέχρι στιγμής, έχουν επικεντρωθεί στα χερσαία οικοσυστήματα (*M. A. Acevedo, L. J. Villanueva-Rivera 2006*). Αυτές οι συσκευές μπορούν να αναπτυχθούν σε μεγάλους αριθμούς για να καλύψουν σημαντικές περιοχές και μεγάλες χρονικές περιόδους. Αυτή η τεχνολογία για πρώτη φορά επιτρέπει την αυτόματη δειγματοληψία της ακουστικής δραστηριότητας των ζωικών κοινοτήτων και των ήχων στα τοπία. Αυτό, με τη σειρά του, επιτρέπει την αντιμετώπιση οικολογικών ζητημάτων και ζητημάτων διατήρησης σε οικολογικό επίπεδο. Το μαζικό σύνολο δεδομένων ήχου που συλλέγεται πρέπει να διαχειρίζεται και να αναλύεται με αποτελεσματικά ακουστικά εργαλεία. Συγκεκριμένα, η έρευνα στην οικολογία έχει μια παράδοση πολλών δεικτών που περιγράφουν με μία μόνο αξία την οικολογική πολυπλοκότητα από την κοινότητα στην κλίμακα τοπίου. Η απαίτηση για ακουστικά εργαλεία οδηγεί στην ταυτόχρονη ανάπτυξη οικολογικών δεικτών ακουστικής βάσης που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της βιοποικιλότητας, σε έρευνες σχετικά με τη δυναμική της κοινότητας και τα τοπικά πρότυπα.

Η βιοακουστική δείχνει μεγάλο ενδιαφέρον για τη σωστή σύγκριση του ήχου για τον αυτόματο εντοπισμό ειδών ή ατόμων (*T. S. Brandes et al. 2006, V. B. Deecke & V. M. Janik 2006, M. A. Acevedo et al. 2009, M. Towsey et al. 2012*). Ωστόσο, οι συγκριτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σε αυτά τα περιβάλλοντα προσαρμόζονται σε στενά συναφείς ήχους, όπως οι φωνές που παράγονται από ένα άτομο, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις είναι άσχετες με τη σύγκριση των ήχων που προέρχονται από κοινότητες και τοπία όπου είναι δύσκολο να προσδιοριστούν ακριβείς καταγραφές χρόνου και συχνότητας. Σε αυτή την εργασία παρουσιάσαμε 28 ακουστικούς δείκτες

εκτίμησης της βιοποικιλότητας, που έχουν προταθεί τα τελευταία χρόνια, από διάφορους ερευνητές της ακουστικής οικολογίας. Οι δείκτες αυτοί έχουν χωριστεί σε δυο ομάδες. Τους δείκτες α ποικιλότητας, που είναι οι ακουστικοί δείκτες που στόχο έχουν να εκτιμήσουν τον πλούτο, την αφθονία και την ποικιλότητα εντός μιας ακουστικής κοινότητας ή ενός ηχοτοπίου και τους δείκτες β ποικιλότητας που προσπαθούν να αξιολογήσουν το επίπεδο των ακουστικών ανισοτήτων μεταξύ των ακουστικών κοινοτήτων. Οι διαφορές α και β υπολογίζονται από τον κατάλογο των οντοτήτων που ανήκουν σε μια μονάδα δείγματος. Οι κύριοι δείκτες α ποικιλότητας συνδέονται με τον αριθμό των οντοτήτων (πλούτος) και τη σχετική αφθονία κάθε συλλογής της οντότητας (ομαλότητα). Οι κύριοι δείκτες β ποικιλότητας προσπαθούν να εκτιμήσουν την ομοιότητα ή την ανομοιογένεια μεταξύ των καταλόγων οντοτήτων που καταγράφονται σε κάθε τοποθεσία. Στις περισσότερες περιπτώσεις, αυτές οι οντότητες είναι είδη, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλες οντότητες, συμπεριλαμβανομένων των γονιδίων, των εξελικτικών μονάδων και των λειτουργικών χαρακτηριστικών (π.χ. σχετικά με τη συμπεριφορά, τη μορφολογία ή την οικολογία) για την εκτίμηση της γενετικής, φυλογενετικής ή λειτουργικής ποικιλομορφίας (S. Pavoine, M. B. Bonsall, 2011).

Οι α ακουστικοί δείκτες φάνηκε πως επιτυγχάνουν θετικά αποτελέσματα, πιθανότατα επειδή επιδιώκουν να δώσουν μια ενιαία αξία, ένα είδος υπογραφής, σε μια ακουστική κοινότητα ή ένα ηχοτοπίο. Αυτοί οι δείκτες εμφάνισαν αποτελέσματα που συγκλίνουν, αποκαλύπτοντας, για παράδειγμα, αλλαγές στον πλούτο των ειδών των πτηνών σύμφωνα με την ακουστική ταυτοποίηση (M. Depraetere et al. 2012) ή τα περίπλοκα πρότυπα του ηχοτοπίου σε διάφορες χρονικές κλίμακες (A. Farina et al. 2011). Εν τούτοις, κάποιες παράμετροι είναι πιθανό να προκαλέσουν αβεβαιότητες στα αποτελέσματα μας, καθώς είναι ικανές να επηρεάσουν την απόδοση των ακουστικών δεικτών. Τέτοιες παράμετροι είναι ο ξαφνικός ή ο μόνιμος θόρυβος περιβάλλοντος, η μεταβολή της απόστασης των ζώων από τον αισθητήρα, η σχετική ένταση και το επαναλαμβανόμενο κάλεσμα των καλούντων ζώων, η επικάλυψη του χρόνου ή/και της συχνότητας μεταξύ των ήχων που προέρχονται από διαφορετικές πηγές. Αυτές οι μεταβολές θα πρέπει να αξιολογηθούν σύντομα σε διαφορετικά περιβάλλοντα, όπως διαφορετικά ενδιαίτημα (δομή βλάστησης και σύνθεση) και διαφορετικές προσπάθειες δειγματοληψίας. Επιπλέον, δεν έχει ακόμη καθοριστεί σαφής συσχέτιση μεταξύ των δεικτών α και του επιπέδου της πολυμορφίας της κοινότητας ή της πολυπλοκότητας του ήχου.

Από την εργασία μας στους ακουστικούς δείκτες, συμπεραίνουμε πως η πιο σημαντική παράμετρος, που επηρεάζει την απόδοση των ακουστικών δεικτών, είναι ο θόρυβος του περιβάλλοντος (υποβάθρου). Φάνηκε να επηρεάζει τους περισσότερους ακουστικούς δείκτες στις περιπτώσεις μελέτης, που εξετάσαμε σε αυτή την εργασία. Συγκεκριμένα, οι δείκτες NP, ADI, B, H, Hf, AR, NDSI και ACI βρέθηκαν να είναι οι πιο ευαίσθητοι στον θόρυβο του περιβάλλοντος και να επηρεάζονται τα αποτελέσματά τους εξ' αιτίας του

θορύβου (διακεκομένης και συνεχούς έντασης σε χαμηλές και υψηλές συχνότητες). Εν τούτοις ο ACI επηρεάζεται από διακοπτόμενους θορύβους περιβάλλοντος, ενώ δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα όταν ο θόρυβος που υπάρχει στο ηχητικό σκηνικό χαρακτηρίζεται από σταθερές εντάσεις. Ο ακουστικός δείκτης φασματική ποικιλότητα, έχει αποδώσει τα καλύτερα αποτελέσματα σε ημέρες με καλό και με ανέμους καιρό και έχει φανεί πως είναι ο λιγότερο ευαίσθητος δείκτης στο θορυβο περιβάλλοντος. Για την αντιμετώπιση του θορύβου, έχουν εφαρμοστεί με μεγάλη επιτυχία κάποιες μέθοδοι μείωσης του θορύβου περιβάλλοντος από τις ηχογραφήσεις κατά την ακουστική ανάλυση. Μεταξύ των σημαντικότερων μεθόδων μείωσης του θορύβου, είναι η μέθοδος της φασματικής αποκατάστασης και η μέθοδος του μη αρνητικού αλγόριθμου παραγοντοποίησης μωσαϊκού (NMF). Επίσης από την ανασκόπηση των κριτηρίων επιλογής ακουστικού δείκτη βιοποικιλότητας σε αυτή την εργασία σημαντικό ρόλο, εκτός των άλλων, παίζει ο χρόνος ηχογράφησης, αφού έχει φανεί πως υπάρχουν κάποιες χρονικές περίοδοι κορύφωσης της ακουστικής δραστηριότητας κατά τις χορωδίες (choruses) της αυγής και του σούρουπου. Σε αυτές τις περιόδους είναι πιο εύκολο για εμάς να εξάγουμε συμπεράσματα για την βιοποικιλότητα ενός ηχοτοπίου.

Μια ακόμη σημαντική παράμετρος, που επηρεάζει την απόδοση των ακουστικών δεικτών και κατά συνέπεια τα αποτελέσματα τους, είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ των ακουστικών δεικτών. Ο βαθμός συσχέτισης, που πιθανόν να έχουν οι δείκτες μεταξύ τους, είναι σε θέση να επηρεάσει σε σημαντικό βαθμό τα αποτελέσματά μας. Από τα άρθρα που εξετάσαμε σε αυτή την εργασία, βρέθηκε πως ισχυρή συσχέτιση μεταξύ τους έχουν οι δείκτες ακουστική ποικιλομορφία, ο δείκτης Shannon και η σχετική αφθονία των πτηνών. Επίσης θετικά συσχετίστηκαν οι δείκτες Df, Dt, D, KS και KL. Οι δείκτες ACI και AR συσχετίστηκαν θετικά, όπως επίσης και ο ACI με τον δείκτη Simpson. Θετικά συσχετίστηκαν επίσης ο ACI με τον BIO και οι δείκτες ADI, AEI & H. Η φασματική ποικιλομορφία είχε πολύ καλή απόδοση και σε συσχέτιση με άλλους δείκτες και μόνη της. Ενώ την χαμηλότερη συσχέτιση με τους άλλους δείκτες είχε ο δείκτης Dcf, με εξαίρεση την συσχέτιση του με τον Df, όπου οι δυο τους λειτουργούν συμπληρωματικά.

Συμπερασματικά μια πληρέστερη εκτίμηση της βιοποικιλότητας θα μπορούσε να εξαχθεί, συνυπολογίζοντας τους κλασικούς δείκτες βιοποικιλότητας με τις παραδοσιακές μεθόδους δηγματοληψίας και τους σύγχρονους ακουστικούς δείκτες βιοποικιλότητας με τα σύγχρονα μέσα ηχογραφήσεων, ούτως ώστε τα αποτελέσματά τους να λειτουργήσουν αθροιστικά στην προσπάθεια αξιολόγησης της βιοποικιλότητας. Η έρευνα των α δεικτών είναι προς το παρόν σε εξέλιξη: αναμένεται να βελτιωθούν οι πρότεροι δείκτες και η εμφάνιση νέων δεικτών τα επόμενα χρόνια. Για παράδειγμα, οι δείκτες ακουστικής ποικιλομορφίας που χρησιμοποιήθηκαν μέχρι τώρα βασίζονταν κυρίως στον δείκτη ομαλότητας Shannon, αλλά άλλοι κλασικοί δείκτες, όπως ο εκθετικός της εντροπίας, θα μπορούσαν να εμπνεύσουν γρήγορα νέους ακουστικούς δείκτες. Ωστόσο, είναι πολύ πιθανό ότι ένας μόνο δείκτης ποτέ δεν θα καλύψει όλη τη βιοποικιλότητα και να είναι αξιόπιστος σε όλα τα

πλαίσια. Οι συνδυασμοί δεικτών θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε καλύτερα αποτελέσματα, όπως ήδη διερευνήθηκε (*M. Towsey et al. 2014*). Συνεπώς, συνιστούμε τη χρήση πολλών συμπληρωματικών α δεικτών.

Σε σύγκριση με τον σημαντικό αριθμό α δεικτών (21), λίγοι δείκτες (07) β έχουν σχεδιαστεί μέχρι σήμερα. Οι β ακουστικοί δείκτες στην τρέχουσα χρήση βασίζονται σε απλές αποστάσεις μεταξύ διαστημάτων χρόνου ή φασματικών προφίλ. Αυτοί οι δείκτες είναι πολύ απλοί και ίσως χρειαστούν μια περαιτέρω επεξεργασία. Συγκεκριμένα, μπορεί να μην είναι βέλτιστοι καθώς όλοι βασίζονται σε μια σύγκριση κατά σημείο. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τον δείκτη Df ο οποίος λειτουργεί με αφαίρεση διαστημάτων αντίστοιχης συχνότητας. Αυτοί οι δείκτες, όπως και ο Df, μπορούν να επιστρέψουν απρόσμενες σημαντικές διαφορές για δύο φάσματα συχνότητας με παρόμοια σχήματα, αλλά μόνο ελαφρώς μετατοπισμένα στη συχνότητα. Τελικά, μια άλλη μέθοδος σύγκρισης της ακουστικής κοινότητας ή τοπίου μπορεί να είναι η χρήση της συμβολικής συσσωρευμένης προσέγγισης (SAX) (*J. Lin et al. 2003; E. P. Kasten 2012*). Το SAX συνίσταται στη μετατροπή μιας αριθμητικής σειράς σε μια σειρά συμβόλων και χαρακτήρων μετασχηματίζοντας τα δεδομένα σε μια διακριτή σειρά γραμμάτων. Το μέγεθος της συμβολοσειράς μπορεί να επιλεγεί καθώς και το μήκος του αλφαβήτου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια μείωση των διαστάσεων και χαμηλότερο όριο. Μέχρι σήμερα το SAX χρησιμοποιείται για την εξόρυξη δεδομένων, ιδιαίτερα για την αναζήτηση παρόμοιων ηχοτόπων την ίδια χρονική στιγμή(βλέπε <http://lib.real.msu.edu/>), αλλά θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση οικολογικών ζητημάτων όπου πρέπει να υπολογιστούν οι φασματικές ανισότητες.

Κλείνοντας αυτή την εργασία, θέλουμε να τονίσουμε την τεράστια και πολύ θετική αλλαγή που έχουν επιφέρει οι ακουστικοί δείκτες βιοποικιλότητας. Έχουν εντυπωσιακές επιδόσεις σε πολλές περιπτώσεις, όπως είδαμε πιο πάνω, με αποτελέσματα τα οποία συμπληρώνουν και είναι παρόμοια με αυτά των κλασικών δεικτών. Στη περίπτωση των ακουστικών δεικτών όμως, αποφεύγουμε όλες τις απαγορευτικές πρακτικές των κλασικών δεικτών, όπως η επέμβαση στην καταμέτρηση και αιχμαλωσία των ειδών, η δυσκολία δηγματοληπτικών μετρήσεων σε μεγάλο εύρος χρονικής κατανομής μετρήσεις για μεγάλες χρονικές περιόδους. Ένα σημαντικό ζήτημα στην οικολογία είναι η συλλογή δεδομένων σε μεγάλες περιοχές και μεγάλα χρονικά διαστήματα με υψηλό και τακτικό ρυθμό επανάληψης (*J. J. D. Greenwood et al. 2006*). Άλλα μειονεκτήματα είναι το μεγάλο κόστος, η δυσκολία δηγματοληψίας σε δύσβατες περιοχές με ακραίες καιρικές συνθήκες, κτλ. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας, φαίνεται να παρέχει πολλά οφέλη στην ακουστική οικολογία και βοηθά στο βαθμό που μια δουλειά (καταμέτρηση και αιχμαλωσία ειδών) που ήταν αρκετά δύσκολη και απαιτητική για πολλά χρόνια, στις μέρες μας απλουστοποιείται και γίνεται αυτοματοποιημένα, πιο γρήγορα, χωρίς κόπο και κόστος. Σε αυτή την εργασία προτείνουμε μια ολιστική προσέγγιση στο ζήτημα της εκτίμησης της βιοποικιλότητας από τους ακουστικούς δείκτες βιοποικιλότητας. Προτείνουμε την από κοινού συμμετοχή των κλασικών δεικτών βιοποικιλότητας και των ακουστικών δεικτών, γιατί, όπως είδαμε από

την εργασία υπάρχει ισχυρή συσχέτιση των κλασικών δεικτών και των ακουστικών δεικτών και ο συνυπολογισμός και των δυο, μπορεί να μας δώσει αποτελέσματα με τη μέγιστη πιστότητα που μπορούμε να έχουμε. Όλες οι εξελίξεις σε σχέση με τους ακουστικούς δείκτες για την εκτίμηση της βιοποικιλότητας και την οικολογία του τοπίου μπορούν να θεωρηθούν ως μια νέα στροφή στη βιοακουστική με την αλλαγή της κλίμακας από το είδος στην κοινότητα και το τοπίο. Τα πλεονεκτήματα των σύγχρονων ακουστικών δεικτών και η ευκολία που προσφέρουν στην αξιολόγηση της βιοποικιλότητας είναι παραπάνω από σημαντικά και στο μέλλον ακόμα περισσότεροι ακουστικοί δείκτες θα συντελέσουν στην πληρέστερη αξιολόγηση μιας ακουστικής κοινότητας και ενός ηχοτοπίου. Παρ' όλα αυτά αυτό δεν πρέπει να μειώσει την αξία των κλασικών δεικτών που παρέχουν συγκεκριμένες πληροφορίες για τον πληθυσμό και τη δυναμική των ειδών. Οι προσεχείς προσπάθειες θα πρέπει να εξετάσουν όλες τις μονάδες της οικολογικής κλίμακας που θα ρίξουν νέο φως στην ακουστική συμπεριφορά και την ακουστική οικολογία των ζώων.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- Amandine Gasc, Jerome Sueur, Sandrine Pavoine, Roseli Pellens, Philippe Grandcolas: Biodiversity Sampling Using a Global Acoustic Approach: Contrasting Sites with Microendemics in New Caledonia. PLoS ONE 8(5): e65311. doi:10.1371/journal.pone.0065311 (2013)
- Monika Rychtarikova, Gerrit Vermeir: Soundscape categorization on the basis of objective acoustical parameters. Applied Acoustics 74 (2013) 240–247
- Michael Towsey, Jason Wimmer, Ian Williamson, Paul Roe: The use of acoustic indices to determine avian species richness in audio-recordings of the environment. Ecological Informatics 21 (2014) 110–119
- Natalie T. Boelman, Gregory P. Asner, Patrich J. Hart, Roberta E. Martin: Multi-trophic invasion resistance in Hawaii: bioacoustics, field surveys, and airborne remote sensing. Ecological Applications, 17(8), 2007, pp. 2137–2144

- Jerome Sueur, Sandrine Pavoine, Olivier Hamerlynck, Stephanie Duvail: Rapid Acoustic Survey for Biodiversity Appraisal. PLoS ONE (2008) DOI: 10.1371/journal.pone.0004065 · Source: PubMed
- Luis J. Villanueva-Rivera, Bryan C. Pijanowski, Jarrod Doucette, Burak Pekin: A primer of acoustic analysis for landscape ecologists. *Landscape Ecol* (2011) 26:1233–1246. DOI 10.1007/s10980-011-9636-9
- Burak K. Pekin, Jinha Jung, Luis J. Villanueva-Rivera, Bryan C. Pijanowski, Jorge A. Ahumada: Modeling acoustic diversity using soundscape recordings and LIDAR-derived metrics of vertical forest structure in a neotropical rainforest
- Marion Depraetere, Sandrine Pavoine, Fréderic Jiguet, Amandine Gasc, Stéphanie Duvail, Jerome Sueur: Monitoring animal diversity using acoustic indices: Implementation in a temperate woodland. *Ecological Indicators* 13 (2012) 46–54
- N. Pieretti, A. Farina, D. Morri: A new methodology to infer the singing activity of an avian community: The Acoustic Complexity Index (ACI). *Ecological Indicators* 11 (2011) 868–873
- Eric P. Kasten, Stuart H. Gage, Jordan Fox, Wooyeong Joo: The remote environmental assessment laboratory's acoustic library: An archive for studying soundscape ecology. *Ecological Informatics* 12 (2012) 50–67
- Bernie Krause, Almo Farina: Using ecoacoustic methods to survey the impacts of climate change on biodiversity. *Biological Conservation* 195 (2016) 245–254
- A. Gasc, J. Sueur, F. Jiguet, V. Devictorc, P. Grandcolas, C. Burrow, M. Depraetere, S. Pavoine: Assessing biodiversity with sound: Do acoustic diversity indices reflect phylogenetic and functional diversities of bird communities? *Ecological Indicators* 25 (2013) 279–287
- Laurent Lellouch, Sandrine Pavoine, Frédéric Jiguet, Herve Glotin, Jerome Sueur: Monitoring temporal change of bird communities with dissimilarity acoustic indices. *Methods in Ecology and Evolution* 2014, 5, 495–505
- Pieretti N., Duarte M.H.L., Sousa-Lima R.S., Rodrigues M., Young R.J., Farina A.: Determining temporal sampling schemes for passive acoustic studies in different tropical ecosystems. *Tropical Conservation Science* Vol.8 (1): 215-234, 2015
- Jérôme Sueur, Almo Farina, Amandine Gasc, Nadia Pieretti, Sandrine Pavoine: Acoustic Indices for Biodiversity Assessment and Landscape Investigation. *ACTA ACUSTICA UNITED WITH ACUSTICA* Vol. 100 (2014) 772 – 781
- A. Gasc, S. Pavoine, L. Lellouch, P. Grandcolas, J. Sueur: Acoustic indices for biodiversity assessments: Analyses of bias based on simulated bird

assemblages and recommendations for field surveys. *Biological Conservation* 191 (2015) 306–312

- Bernie Krause: Anatomy of the soundscape: Evolving perspectives. *J. Audio Eng. Soc.*, Vol.56, No ½, 2008 January
- Frédéric Bertucci, Eric Parmentier, Gaël Lecellier, Anthony D. Hawkins & David Lecchini: Acoustic indices provide information on the status of coral reefs: an example from Moorea Island in the South Pacific. *Scientific Reports* | 6:33326 | DOI: 10.1038/srep33326 (2016)
- Alison J. Fairbrassa, Peter Rennert, Carol Williams, Helena Titheridge, Kate E. Jones: Biases of acoustic indices measuring biodiversity in urban areas. *Ecological Indicators* 83 (2017) 169–177
- Daniel T. Blumstein, Daniel J. Mennill, Patrick Clemins, Lewis Girod, Kung Yao, Gail Patricelli, Jill L. Deppe, Alan H. Krakauer, Christopher Clark, Kathryn A. Cortopassi, Sean F. Hanser, Brenda McCowan, Andreas M. Ali, Alexander N. G. Kirschel: Acoustic monitoring in terrestrial environments using microphone arrays: applications, technological considerations and prospectus. *Journal of Applied Ecology* 2011, 48, 758–767
- Susan Fuller, Anne C. Axel, David Tucker, Stuart H. Gage: Connecting soundscape to landscape: Which acoustic index best describes landscape configuration? *Ecological Indicators* 58 (2015) 207–215
- Alice Eldridge, Michael Casey, Paola Moscoso, Mika Peck: A new method for ecoacoustics? Toward the extraction and evaluation of ecologically-meaningful soundscape components using sparse coding methods. *PeerJ*: e 2108; DOI:10.7717/peerj.2108 (2015)
- Kurt M. Fristrup and Dan Mennitt: BIOACOUSTICAL MONITORING IN TERRESTRIAL ENVIRONMENTS. *Acoustics Today*, July 2012
- Ammie K. Kalan, Alex K. Piel, Roger Mundry, Roman M. Wittig, Christophe Boesch and Hjalmar S. Kühl: Passive acoustic monitoring reveals group ranging and territory use: a case study of wild chimpanzees (*Pan troglodytes*). *Frontiers in Zoology* (2016); DOI 10.1186/s12983-016-0167-8
- Laurent Lellouch, Sandrine Pavoine, Frederic Jiguet, Herve Glotin, Jerome Sueur: Monitoring temporal change of bird communities with dissimilarity acoustic indices. *Methods in Ecology and Evolution* 2014, 5, 495–505; doi: 10.1111/2041-210X.12178
- Tzu-Hao Lin, Shih-Hua Fang & Yu Tsao: Improving biodiversity assessment via unsupervised separation of biological sounds from longduration recordings. *Scientific Reports* | 7: 4547 | DOI:10.1038/s41598-017-04790-7 (2017)

- Christos Mammides, Eben Goodale, Salindra K. Dayananda, Luo Kanga, Jin Chena: Do acoustic indices correlate with bird diversity? Insights from two biodiverse regions in Yunnan Province, south China. *Ecological Indicators* 82 (2017) 470 – 477
- Elizabeth M. McDonald, Janelle L. Morano, Annamaria I. DeAngelis, Aaron N. Rice: Building time-budgets from bioacoustic signals to measure population-level changes in behavior: a case study with sperm whales in the Gulf of Mexico. *Ecological Indicators* 72 (2017) 360 – 364
- Ana Širovic, Ally Rice, Emily Chou, John A. Hildebrand, Sean M. Wiggins, Marie A. Roch: Seven years of blue and fin whale call abundance in the Southern California Bight. *ENDANGERED SPECIES RESEARCH*; Vol. 28: 61–76, 2015
- Elodie JI Ledee, Michelle R Heupel, Andrew J Tobin and Colin A Simpfendorfer: Movements and space use of giant trevally in coral reef habitats and the importance of environmental drivers. *Animal Biotelemetry* (2015) 3:6
- Jamie N. McWilliam & Anthony D. Hawkins: A comparison of inshore marine soundscapes. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* (2013)
- Almo Farina & Philip James: The Acoustic communities: Definition, description and ecological role. *BioSystems* 147 (2016) 11 - 20
- Karolin Thomisch, Olaf Boebel, Christopher W. Clark, Wilhelm Hagen, Stefanie Spiesecke, Daniel P. Zitterbart, Ilse Van Opzeeland: Spatio-temporal patterns in acoustic presence and distribution of Antarctic blue whales *Balaenoptera musculus intermedia* in the Weddell Sea. *ENDANGERED SPECIES RESEARCH* Vol. 30: 239–253, 2016
- Magurran, A. E. (2004) *Measuring Biological Diversity*. U.K.: Blackwell Science
- J. Lin, E. Keogh, S. Lonardi, B. Chiu: A symbolic representation of time series with implications for streaming algorithms. *Proceedings of the 8th ACM SIGMOD Workshop on Research Issues in Data Mining and Knowledge Discovery*, San Diego, California, USA, 2003.
- J. J. D. Greenwood, R. A. Robinson: Principles of sampling. In: *Ecological census techniques*. W. J. Sutherland (ed.). Cambridge University Press, Cambridge, 2006, 11–86.
- Καρανδεινός Μ. Γ. (2007) *Ποσοτικές Οικολογικές Μέθοδοι*. Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο