

## CONTAMINACIÓN ACÚSTICA Y DINÁMICA DE POBLACIONES

Carlos H. Ramirez C.\*

Universidad Católica del Maule, Casilla 617, Talca, Chile

### Resumen

En este trabajo se da a conocer como la dinámica de alguna población se ve modificada al considerar la contaminación acústica (llámese ruido). Bajo algunas hipótesis propondremos un primer modelo matemático para intentar explicar esta situación.

$$\begin{cases} N_1'(t) = r_1(f, p)N_1 \left(1 - \frac{N_1}{K_1}\right) - \alpha N_1 + (\beta - \beta_2)N_3 \\ N_2'(t) = r_2(f, p)N_2 \left(1 - \frac{N_2}{K_2}\right) - \alpha_3 N_2 + (\alpha - \alpha_2)N_1 + \beta_2 N_3 \\ N_3'(t) = r_3(f, p)N_3 \left(1 - \frac{N_3}{K_3}\right) - \beta N_3 + \alpha_2 N_1 + \alpha_3 N_2. \end{cases}$$

Joint work with:

**Fernando Córdova**.<sup>1</sup>, **Alejandro Rojas**.<sup>2</sup>, **Nelson Velasquez**.<sup>3</sup>, **Moises Bravo**.<sup>4</sup>, **Felipe Moreno**.<sup>5</sup>, Universidad Católica del Maule, Casilla 617, Talca, Chile.



\*This research project was supported by Beca Doctoral UCM from the Universidad Católica del Maule., e-mail: carloshrc1989@gmail.com

<sup>1</sup>e-mail: fcordovalepe@gmail.com

<sup>2</sup>e-mail: arojaspalma@gmail.com

<sup>3</sup>e-mail: nelson.velasquez@gmail.com

<sup>4</sup>e-mail: moisesbravog@gmail.com

<sup>5</sup>e-mail: f.n.moreno.gomez@gmail.com

# 1. Introduction

El planeta está lleno de sonidos de origen abiótico y biótico, y los animales pueden usar esos sonidos para obtener información sobre el entorno que los rodea, y así buscar éxito tanto en reproducción como en supervivencia. Sin embargo, cada vez es más claro que la presencia de sonidos hechos por el hombre, es decir los sonidos antropogénicos, tienen el potencial de socavar la capacidad de los animales para explotar los sonidos ambientales útiles.

La contaminación acústica, crece a medida que crece las industrias en gran parte del mundo. El conocimiento de cómo las especies responden a este ruido, puede ser crucial para mantener la biodiversidad y los procesos ecológicos. En los últimos tiempos se han desarrollado trabajos como en [2], [3] y [5] que tratan con esta problemática.

La percepción auditiva juega un rol importante en este fenómeno, ya que el umbral de audibilidad cambia en diferentes especies. La evidencia de estudios en [1], [4] y [6] sugieren que el ruido puede ser una restricción importante en la evolución de la sensibilidad auditiva. Por ejemplo, las especies que viven en ambientes ruidosos a menudo se caracterizan por una menor sensibilidad en comparación con las especies que viven en ambientes más tranquilos. Una mejor audición puede conferir ventajas en términos de una mayor capacidad para detectar, por ejemplo, señales acústicas de depredadores y presas o sonidos de compañeros distantes. Sin embargo, una audición sensible también puede tener desventajas al captar frecuencias de ruido no deseadas.

Si bien es natural pensar que el ruido socava la capacidad de los animales para explotar los sonidos ambientales útiles, existen trabajos como en [7] que prueban que el ruido disminuye la diversidad de especies sin embargo aumenta el éxito reproductivo.

En este informe, damos un primer modelo matemático que describe el comportamiento de alguna población distribuida en tres zonas y que se ve afectada por un ruido el cual es emitido por una fuente fija.

# 2. Física del Sonido

**Sonido:** Consiste en la propagación de una perturbación en un medio elástico.

Las características del medio para que la onda sonora se propague debe ser de un medio elástico, tener masa e inercia. En particular el aire posee además algunas características relevantes para la propagación del sonido:

- La propagación es lineal. Esto permite que diferentes ondas sonoras se propaguen por el mismo espacio al mismo tiempo sin afectarse.
- El medio es no dispersivo. Por esta razón las ondas se propagan a la misma velocidad independientemente de su frecuencia o amplitud.
- El medio es homogéneo. No existen direcciones de propagación privilegiadas por lo que el sonido se propaga esféricamente.

**Magnitudes físicas del Sonido:** Como todo movimiento ondulatorio, el sonido puede representarse mediante la Transformada de Fourier como una suma de curvas sinusoides.

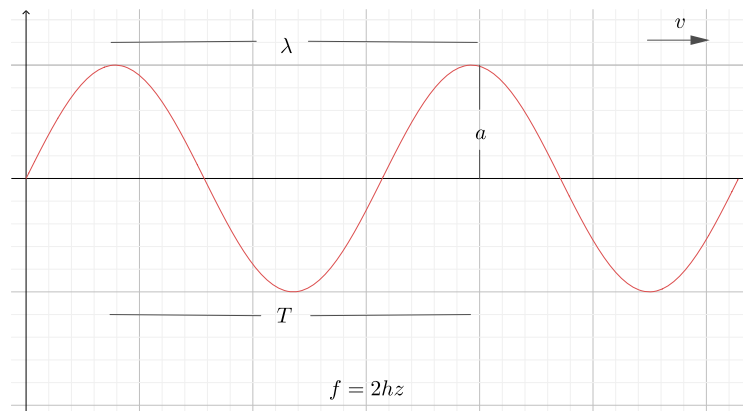
- **Periodo:** ( $T$ ): Es el tiempo que tarda en repetirse una onda de sonido

- **Frecuencia** ( $f$ ): La frecuencia de un sonido se mide en Hercios (Hertz,  $Hz$ ) y describe la cantidad de ondas por segundo que completan un ciclo. Es el tono o altura del sonido. Así se diferencia un sonido agudo de uno grave. El oído humano es capaz de percibir las frecuencias que se encuentren entre  $20 Hz$  y  $20 kHz$ . La frecuencia tiene la siguiente relación con el periodo

$$f = \frac{1}{T}$$

- **Amplitud** ( $a$ ): El sonido se mueve a través del aire en forma de ondas, la amplitud es la distancia entre el punto más alto y el más bajo de una onda. La amplitud del sonido es la intensidad (lo que comunmente llamamos "el volumen"). Es lo que hace que lo escuchemos en nuestros oídos más fuerte o más suave.
- **Longitud de onda** ( $\lambda$ ): la distancia que recorre una onda en un período de tiempo  $T$ .
- Si detonamos la **Velocidad** de la onda por ( $v$ ) se tiene la siguiente relación

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

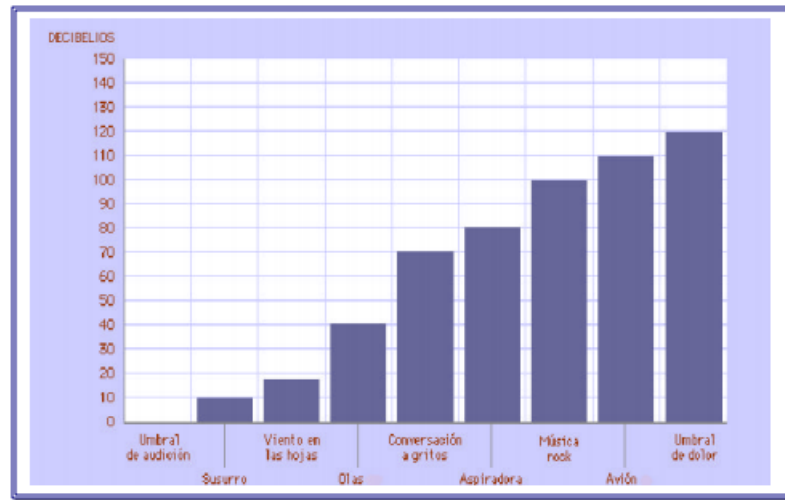


**Presión Sonora:** Según lo visto hasta el momento, el sonido puede considerarse como una sucesión de ondas que se propaga por el aire. Sin embargo si nos ubicamos en un punto en el espacio (una posición fija) veremos como la presión atmosférica aumenta y disminuye periódicamente a medida que tienen lugar las sucesivas perturbaciones. La presión atmosférica se mide en Pascal y es del orden de los  $100,000 Pa$ . Sin embargo, cambios de presión debidos al pasaje de una onda sonora son muy pequeños respecto a este valor de presión atmosférica. Los sonidos más intensos que se perciben implican un incremento de  $20 Pa$ . Por esta razón, para distinguir el incremento de presión de la presión atmosférica en ausencia de sonido se le denomina presión sonora ( $p$ ). La presión sonora es la presión que se debe agregar a la presión atmosférica para obtener el valor real de presión atmosférica en presencia de sonido.

Las presiones sonoras audibles varían entre los  $20 microPa$  y los  $20 Pa$ . Es importante apreciar que es un rango muy importante de variación (de un millón de veces). Esta gran cantidad de cifras es incómoda de manejar. Es por esta razón que normalmente se expresa la presión sonora en decibels y se denomina Nivel de Presión Sonora ( $NPS$  o  $SPL$  por sus iniciales en inglés). Se define un nivel de presión sonora de referencia, que es aproximadamente la mínima presión audible ( $20 microPa$ ). Se define el Nivel de Presión Sonora como:

$$NPS = 20 \log \left( \frac{P_1}{P_0} \right),$$

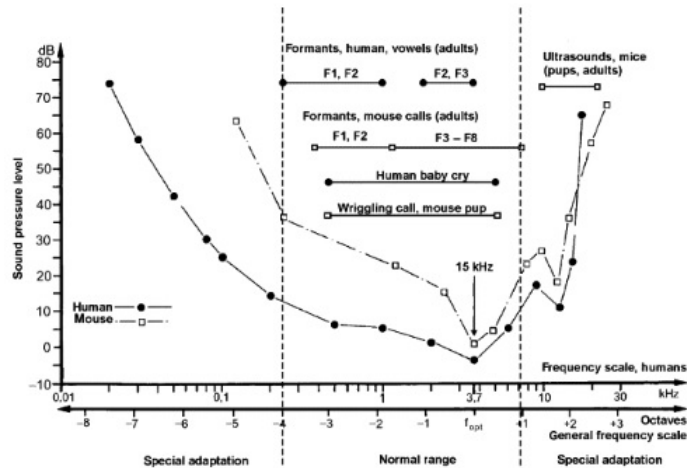
donde  $P_0 = 20\text{microPa}$  es la presión sonora de referencia del medio. A continuación damos a modo de gráfico algunos niveles de presión sonora.



### 3. Percepción del Sonido

La base de la percepción auditiva es la sensación, es decir, los sonidos deben ser audibles para el individuo. Los sonidos son audibles si sus componentes de frecuencia están dentro del audiograma del animal del individuo.

**Audiograma:** Curva que ilustra los niveles mínimos de presión sonora de tonos audibles, como una función de la frecuencia del tono. el siguiente gráfico es una muestra de un audiograma.



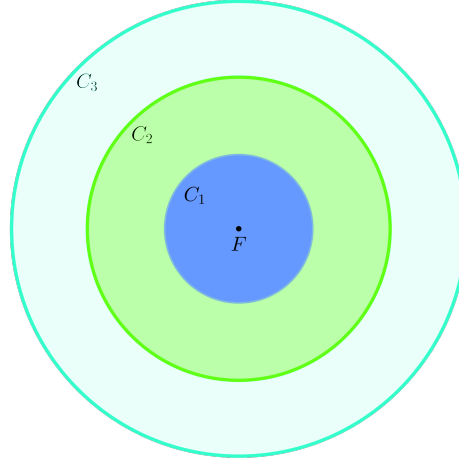
### 4. Un Primer Modelo Matemático

Consideremos  $N$  individuos de alguna población de una especie, distribuida en tres zonas  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$  de una área circular. Inicialmente en cada zona habitan  $N_1$ ,  $N_2$  y  $N_3$  individuos de la especie

respectivamente, esto es

$$N = N_1 + N_2 + N_3$$

Supondremos que esta área circular se encuentra alrededor de una fábrica o cualquier industria que produzca ruido, es decir sonido atropogénico. Asumimos que la presión del ruido, para un primer análisis, cambia continua e inversamente proporcional respecto a la distancia de la fuente emisora  $F$ , la cual sera fija. Gáficamente esto es:

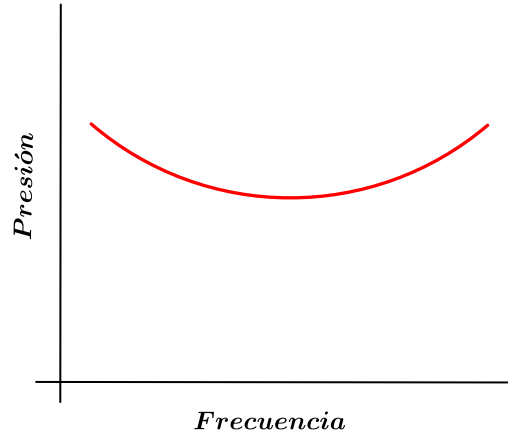


Las poblaciones  $N_1$ ,  $N_2$  y  $N_3$  cuando la industria no está trabajando, es decir cuando hay ausencia de ruido, las tres poblaciones se mantienen en su zonas pero cada población sigue un comportamiento logístico de crecimiento, esto es

$$\begin{cases} N_1'(t) = r_1 N_1 \left(1 - \frac{N_1}{K_1}\right) \\ N_2'(t) = r_2 N_2 \left(1 - \frac{N_2}{K_2}\right) \\ N_3'(t) = r_3 N_3 \left(1 - \frac{N_3}{K_3}\right) \end{cases} \quad (1)$$

Donde  $r_1$ ,  $r_2$  y  $r_3$  son las tasas intrínsecas de crecimiento y  $K_1$ ,  $K_2$  y  $K_3$  son las capacidades de carga de cada zona  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$  respectivamente.

Como vimos en la sección anterior la percepción auditiva de una especie, es importante para comprender los efectos del ruido sobre esta. Como ya se dijo la presión del ruido cambia continua e inversamente proporcional respecto a la distancia de la fuente emisora  $F$ , entonces consideremos el siguiente audiograma hipotético para nuestra especie.



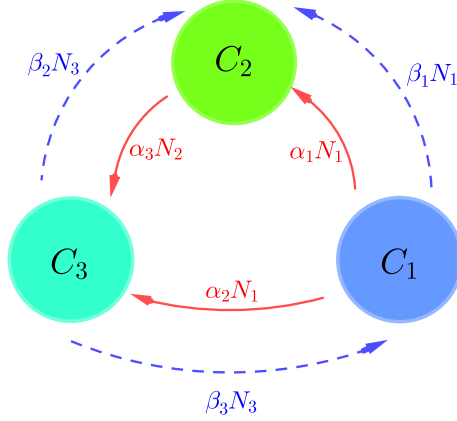
donde la curva indica lo niveles mínimos de presión sonora de tonos audibles.

Si bien es cierto que el ruido influye en una especie de manera de alarma, defensa, sexual, etc, estamos interesados en como la contaminación acústica influye en la tasa de crecimiento de una población pues hay sonidos dirigidos a individuos del sexo contrario para facilitar la cópula. Esto quiere decir que supondremos que las tasas de crecimiento dependen tanto de la presión sonora como de la frecuencia del ruido emitido por la fuente  $F$ .

$$r_i := r_i(f, p) \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

donde  $f$  denota la frecuencia y  $p$  la presión sonora. Notemos que cuando la industria comienza a trabajar, el ruido comienza a emitirse de manera continua e indefinadamente, además si suponemos que  $K_3 < K_1 < K_2$  entonces comienza a observarse un flujo migratorio.

Debido alto nivel de presión sonora en la zona  $C_1$ ,  $\alpha_1 N_1$  y  $\alpha_2 N_1$  individuos emigran a las zonas  $C_2$  y  $C_3$  respectivamente, pero debido ah que  $K_3 < K_1 < K_2$ , es decir hay más recurso en esta zona que en  $C_3$  y menor que  $C_2$  entonces reciben  $\beta_3 N_3$  inmigrantes de la zona  $C_3$  y emigran  $\beta_1 N_1$  a la zona  $C_2$ . En la zona  $C_2$  también sucede un fenómeno parecido debido al ruido, emigran  $\alpha_3 N_2$  individuos a la zona  $C_3$  de menor nivel de presión sonora pero reciben los  $\alpha_1 N_1$  de la zona  $C_1$  de mayor de presión sonora, además como en esta zona hay mayor recurso que  $C_1$  y  $C_3$ , reciben los  $\beta_1 N_1$  y  $\beta_2 N_3$  individuos de las zonas  $C_1$  y  $C_3$  respectivamente. En la zona  $C_3$  notemos que el nivel de presión sonora llega muy bajo por lo que suponemos que no hay necesidad de que la especie emigre debido a este fenómeno, sin embargo emigran  $\beta_2 N_3$  y  $\beta_3 N_3$  a las zonas  $C_2$  y  $C_1$  respectivamente, ya que hay menor recurso que en esas dos zonas, además de recibir los  $\alpha_2 N_1$  y  $\alpha_3 N_2$  individuos de las zonas  $C_1$  y  $C_2$  respectivamente en la cuales existe una mayor presión sonora. Para entender mejor este fenómeno proporcionamos el siguiente gráfico:



De esta manera el sistema (1) se ve perturbado por los nuevos parámetros que aparecen debido al flujo migratorio que originó la presencia del ruido en la zona circular donde habita la especie.

Notemos que

$$\begin{aligned}\alpha_1 + \alpha_2 + \beta_1 &\leq 1 \\ \alpha_3 &\leq 1 \\ \beta_2 + \beta_3 &\leq 1\end{aligned}$$

Luego haciendo  $\alpha := \alpha_1 + \alpha_2 + \beta_1$  y  $\beta := \beta_2 + \beta_3$ . El nuevo sistema que modela el fenómeno descrito viene dado por

$$\begin{cases} N_1'(t) = r_1(f, p)N_1 \left(1 - \frac{N_1}{K_1}\right) - \alpha N_1 + (\beta - \beta_2)N_3 \\ N_2'(t) = r_2(f, p)N_2 \left(1 - \frac{N_2}{K_2}\right) - \alpha_3 N_2 + (\alpha - \alpha_2)N_1 + \beta_2 N_3 \\ N_3'(t) = r_3(f, p)N_3 \left(1 - \frac{N_3}{K_3}\right) - \beta N_3 + \alpha_2 N_1 + \alpha_3 N_2. \end{cases} \quad (3)$$

En particular si asumimos que las tasas intrínsecas  $r_i$  con  $i = 1, 2, 3$  se mantienen constante  $r_0 > 0$  cuando la especie no percibe ruido, para luego decrecer hasta poder llegar nuevamente a ser constante y tomar valores  $r_1$  negativos cuando la presión sonora toma valores suficientemente grandes  $p_0$ , para tener efectos radicales sobre la especie, y además si consideramos que la curva crítica de nivel de percepción de la especie viene dada por la ecuación

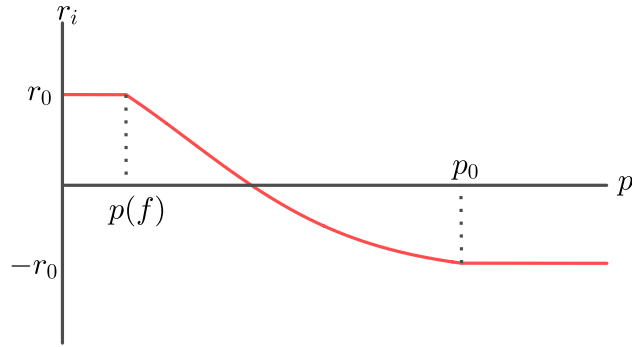
$$p = h_0(f - h_1)^2 + h_2$$

para cualquier  $h_0, h_1$  y  $h_2$  adecuados, entonces podemos asumir los siguientes ejemplos.

Cuando las tasas intrínsecas  $r_i$  con  $i = 1, 2, 3$  decaen de manera exponencial pero de forma "brusca.<sup>es</sup> decir no suave, podemos proponer la siguiente tasa

$$r_i(f, p) = \begin{cases} r_0 & p < h_0(f - h_1)^2 + h_2 \\ \frac{\eta_0}{1 + e^{p - \eta_1}} & h_0(f - h_1)^2 + h_2 \leq p < p_0 \\ -r_0 & p \geq p_0 \end{cases} \quad (4)$$

con  $f \in [f_0, f_1]$ ,  $r_0 < \eta_0$  y  $\eta_0 = r_0(1 + e^{p_0 - \eta_1})$ . Esto se puede ver gráficamente



Un segundo ejemplo se da cuando las tasas intrínsecas decaen de manera suave, en este caso proponemos la siguiente tasa

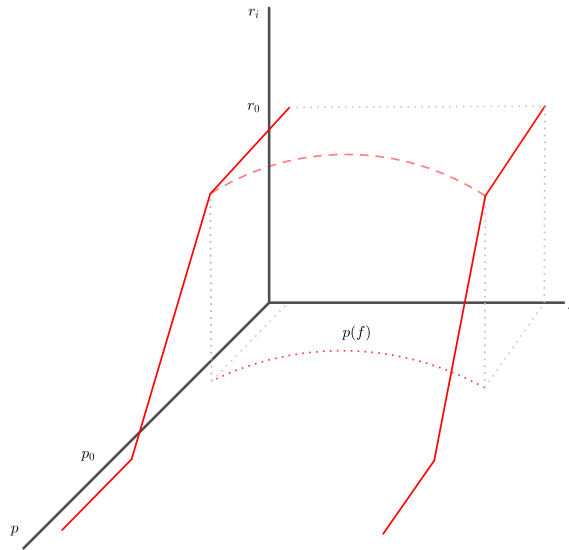
$$r_i(f, p) = \begin{cases} r_0 & p < h_0(f - h_1)^2 + h_2 \\ (p - a)(p - b)(p - c) & h_0(f - h_1)^2 + h_2 \leq p < p_0 \\ -r_1 & p \geq p_0 \end{cases} \quad (5)$$

con  $a, b$  y  $c$  adecuados,  $f \in [f_0, f_1]$ , y

$$r_0 = \max_{p \in [a, b]} (p - a)(p - b)(p - c)$$

$$-r_1 = \min_{p \in [b, c]} (p - a)(p - b)(p - c)$$

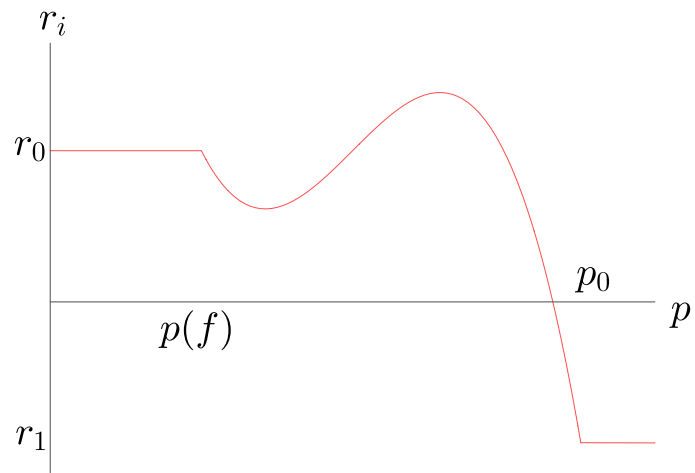
que gráficamente se puede ver como la gráfica anterior pero suave en  $p(f)$  y  $p_0$ . Para una mejor comprensión del comportamiento de las tasas daremos un la gráfica involucrando  $r_i, f$  y  $p$ .



Como tercer y ultimo ejemplo, notemos que en [7] se da el caso que una especie puede llegar a tener un cierto éxito reproductivo, debido a la posibilidad de que los depredadores presentes en áreas ruidosas, especialmente aquellos que dependen de señales acústicas, tengan menos posibilidades de capturar su presa, lo que también conduciría a un aumento en la densidad de la población. Entonces



un comportamiento hipotético de las tasas  $r_i$  respecto a la presión para un tono de frecuencia entre  $f_0$  y  $f_1$  se da a continuación:



## Referencias

- [1] Scholik AR, Yan HY (2001) Effects of underwater noise on auditory sensitivity of a cyprinid fish. *Hear Res* 152:17-24
- [2] Bayne, E. M., Habib, L., and Boutin, S. (2008). Impacts of chronic anthropogenic noise from energy-sector activity on abundance of songbirds in the boreal forest. *Conservation Biology*, 22, 1186-1193.
- [3] Casper, B. M., Halvorsen, M. B., and Popper, A. N. (2012). Are sharks even bothered by a noisy environment In A. N. Popper and A. Hawkins (Eds.), *The Effects of Noise on Aquatic Life* (pp. 93-97). New York: Springer-Verlag
- [4] Lugli M, Yan HY, Fine ML (2003) Acoustic communication in two freshwater gobies: the relationship between ambient noise, hearing thresholds and sound spectrum. *J Comp Physiol A* 189:309-320
- [5] Goodwin, S. E., and Shriver, W. G. (2011). Effects of traffic noise on occupancy patterns of forest birds. *Conservation Biology*, 25, 406-411.
- [6] Amoser S, Ladich F (2005) Are hearing sensitivities of freshwater fishes adapted to the ambient noise of their habitats *J Exp Biol* 208:3533-3542
- [7] Francis, C.D. et al. (2009) Noise pollution changes avian communities and species interactions. *Curr. Biol.* 19, 1415-1419