

Respuesta Lombard Frente a Ruidos Antropogénicos Cuasiperiódicos: Una propuesta teórica-matemática

Lombard Response to Quasiperiodic Anthropogenic Noise: A Theoretical-Mathematical Approach

Carlos Ramirez-Carrasco¹

¹ *Departamento de Matemática, Física y Estadística, Universidad Católica del Maule, Talca, Chile*

Fecha de recepción del manuscrito: 16/12/2022

Fecha de aceptación del manuscrito: 23/12/2022

Fecha de publicación: 30/12/2022

Resumen—El ruido es una forma de contaminación resultante del innegable aumento de la industrialización en todo el mundo. El ruido antropogénico puede llegar a tener efectos negativos sobre la supervivencia de una especie, pues puede enmascarar las señales acústicas relevantes para el forrajeo, búsqueda de pareja y distribución. Ante esto, el efecto Lombard actúa como un mecanismo de compensación, y se refiere a un aumento de la amplitud de las señales acústicas en respuesta a un aumento de nivel de ruido de fondo. En este estudio, se propone un enfoque teórico-matemático para ilustrar una clasificación simple basada en tres tipos generales de respuesta Lombard. Finalmente, mediante simulaciones numéricas, analizamos gráficamente los efectos de las respuestas Lombard en un modelo matemático de persistencia poblacional en un entorno con ruido crítico y cuasiperiódico.

Palabras clave—Respuesta Lombard. Adaptación Acústica, Persistencia, Modelación Matemática, Simulaciones Numéricas

Abstract—Noise is a form of pollution resulting from the undeniable increase in industrialization worldwide. Anthropogenic noise can have negative effects on the survival of a species, as it can mask acoustic signals relevant to foraging, mate searching and distribution. In response to this, the Lombard effect acts as a compensatory mechanism, and refers to an increase in the amplitude of acoustic signals in response to an increase in background noise level. In this study, a theoretical-mathematical approach is proposed to illustrate a simple classification based on three general types of Lombard response. Finally, by means of numerical simulations, we graphically analyze the effects of Lombard responses in a mathematical model of population persistence in a critical and quasi-periodic noise environment.

Keywords—Lombard Response. Acoustic Adaptation, Persistence, Mathematical Modelling, Numerical Simulations.

INTRODUCCIÓN

Según la Organización Mundial de la Salud, la Directiva Marco sobre la Estrategia Marina de la Comisión Europea y la legislación internacional (como la Ley Nacional de Política Ambiental de Estados Unidos), el ruido antropogénico es una de las formas de contaminación más peligrosas, llegando a estar omnipresente en los ecosistemas acuáticos y terrestres (Kunc y Schmidt, 2019; Organization et al., 2011).

El ruido antropogénico actúa como un sonido que enmascara las señales acústicas relevantes para la supervivencia de los animales, llegando a afectar negativamente el forrajeo (Parris y Schneider, 2009; Slabbekoorn y Peet, 2003), la co-

municación (Dooling et al., 2009; Erbe et al., 2016; Römer, 2013) y la distribución de las especies (Ramirez-Carrasco et al., 2022b; McClure et al., 2013, 2017). En particular, se denomina ruido crítico, a aquel ruido que por su alto nivel de intensidad afecta positivamente la tasa de mortalidad de la población. Por ejemplo, el sonar naval provoca varamiento de zifios, aumentando así su tasa de mortalidad (Filadelfo et al., 2009). El ruido superior a 100 dB procedente de los buques afecta negativamente al comportamiento de evitación a los depredadores en los peces damisela, aumentando así su tasa de mortalidad inducida por depredación (Simpson et al., 2016), así mismo afecta negativamente la supervivencia temprana de los invertebrados marinos al aumentar la mortalidad de las larvas recién nacidas (Nedelec et al., 2014). El ruido crónico superior a 65 dB procedente del tráfico afecta

las tasas de crecimiento y mortalidad de los embriones en los pinzones cebra (Potvin y MacDougall-Shackleton, 2015).

Por otro lado, en respuesta al aumento del ruido, algunos animales aumentan la intensidad de sus señales acústicas. Este fenómeno se conoce como efecto Lombard (Lombard, 1911; Sinnott et al., 1975). En principio, los efectos de este fenómeno son positivos, pues las señales acústicas de los animales siguen siendo reconocidas por sus receptores de destino (Luo et al., 2018; Helble et al., 2020). Sin embargo, cuando el ruido antropogénico es crítico, el uso de señales acústicas autogeneradas de mayor intensidad no solo aumentan el ruido de fondo, sino también los costos energéticos (Oberweger y Goller, 2001; Warren et al., 2006; Barber et al., 2010; Read et al., 2014; Brown et al., 2021), conductuales (Swaddle et al., 2015; Farina, 2017), y la exposición a la detección por parte de receptores no deseados, por ejemplo depredadores (Zollinger y Brumm, 2015; Brumm y Todt, 2002; Brumm, 2004; Luczkovich et al., 2016). Por lo tanto, cuando el ruido es crítico, el efecto Lombard puede influir negativamente en las tasas de supervivencia de la población (Sementili-Cardoso y Donatelli, 2021).

Dado que se necesitan largas series temporales de tamaños poblacionales, es difícil identificar los efectos del ruido en la dinámica de poblaciones a partir de datos observados. En consecuencia, cada vez es más útil construir modelos matemáticos para predecir y explicar el fenómeno en el mundo real. Los modelos matemáticos existentes, consideran el ruido como un factor estocástico y no tienen en cuenta el efecto Lombard (Spagnolo et al., 2003; Upadhyay et al., 2007; Das y Samanta, 2018). Sin embargo, recientemente en (Ramirez-Carrasco et al., 2022a) se propone un modelo determinista para estudiar los efectos del ruido crítico en la persistencia de una especie mono-específica que experimenta el efecto Lombard.

Este trabajo, pretende complementar lo realizado en (Ramirez-Carrasco et al., 2022a), al proponer tres nuevas definiciones para tres tipos diferentes de respuestas Lombard y se analiza computacionalmente sus efectos sobre la persistencia de una especie mono-específica expuesta a un ruido crítico y cuasiperiódico.

EL EFECTO LOMBARD

El innegable crecimiento de las poblaciones humanas, junto con el ruido generado por la industrialización y el transporte, suponen una amenaza para muchas especies que dependen de la vocalización en sus relaciones intra-específicas. Así, un mecanismo de respuesta para compensar los efectos del enmascaramiento que ejerce el aumento del ruido es aumentar la intensidad de las señales acústicas (efecto Lombard). Por ejemplo existen muchos estudios empíricos donde se ha demostrado que en varias especies de aves (Luo et al., 2018; Brackenbury, 1979; Calder III, 1990) y mamíferos (Holt et al., 2009; Helble et al., 2020), la intensidad de sus señales aumenta en respuesta a un incremento del ruido. En particular, en (Holt y Johnston, 2014) se utilizó un enfoque experimental y se encontró que

en *Cyprinella venusta* los niveles espectrales de las señales acústicas aumentaron con el ruido de fondo, lo que indica la presencia del efecto Lombard en los peces (ver Fig. 1).

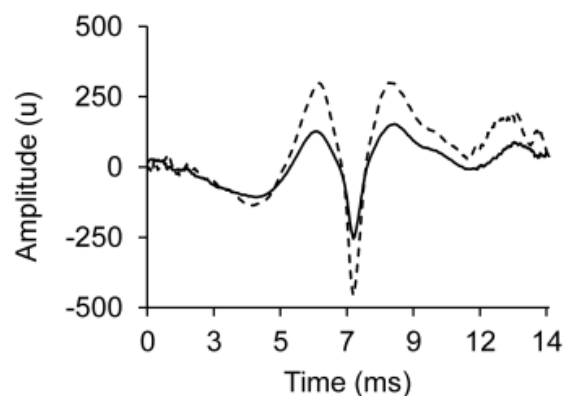


Figura 1: Amplitud a lo largo del tiempo de las señales acústicas de un individuo de *Cyprinella venusta*. Se observa una mayor amplitud de las señales acústicas en condiciones ruidosas (línea discontinua) y una menor amplitud en condiciones silenciosas (línea continua). (Imagen tomada de (Holt y Johnston, 2014))

En esta sección, se propone una definición matemática para el efecto Lombard. Para eso, primero se define una función no negativa del tiempo $I(t)$ para representar el nivel de intensidad de ruido de fondo que experimenta una población en el momento t .

Definición 1 (Efecto Lombard) Se define una función Lombard como toda $\beta(I) : [0, +\infty[\rightarrow [0, \beta^*[$ que representa el nivel de intensidad de la señal acústica emitida por un congénere por unidad de tiempo en respuesta al ruido de fondo I , tal que

- $\frac{\partial \beta}{\partial I} \geq 0$ (no decreciente),
- $\beta^* = \sup \beta(I)$ (acotada).

En la definición anterior, el primer ítem indica el aumento de la intensidad de la señal acústica en respuesta al aumento del ruido. El segundo ítem indica que, por limitaciones físicas, existe una cota para la intensidad de la señal acústica emitida (Brumm y Zollinger, 2017).

TIPOS DE RESPUESTA LOMBARD

Si bien es cierto que no hay evidencia suficiente para afirmar que en todas las especies ocurre el efecto Lombard. En aquellas donde empíricamente se ha evidenciado el fenómeno, se observa que hay diferencias en el modo de respuestas. Por ejemplo, en (Luo et al., 2017a) se obtuvo que los murciélagos (*Eptesicus fuscus*) tardaron 30 ms en aumentar la amplitud de sus señales acústicas tras el inicio del ruido. Mientras, que en (Hardman et al., 2017) para una ave (*Serinus canaria*) se obtuvo una latencia mayor de 300 ms además de que son capaces de aumentar la amplitud de sus cantos a mitad de canción y a mitad de frase sin hacer pausas. En (Luo et al., 2017b) se realizó un seguimiento

del efecto Lombard en murciélagos (*Phyllostomus discolor*) durante tres meses y se descubrió que el efecto Lombard se debilitaba gradualmente.

Estos hallazgos muestran que el efecto Lombard está modulado por la experiencia sensorial, y posiblemente por la habituación (Groves y Thompson, 1970; Morton, 1975; Thompson, 2009). Sugiriendo que la plasticidad de las señales acústicas proporciona diferentes tipos de respuesta Lombard.

En esta sección, se propone un enfoque teórico-matemático para ilustrar una clasificación simple basada en tres tipos generales de respuesta Lombard. Los cuales se han denominado consecutivamente L1, L2 y L3.

Respuesta Lombard L1

Esta respuesta se obtiene suponiendo que el nivel de intensidad de las señales acústicas emitidas por un conoespecífico aumenta de forma lineal a medida que aumenta la intensidad del ruido de fondo, hasta llegar a un punto máximo en el cual se estabiliza la intensidad de las señales. Es decir, la tasa de intensidad de ruido percibido es constante en función del grado de sensibilidad de la especie (ver Fig. 2).

Para modelar matemáticamente esta primera respuesta Lombard, se define la tasa per-capita de intensidad de señal emitida por unidad de tiempo como cI , donde c es el grado de sensibilidad de la especie al ruido. Entonces se puede formular una función que representa la respuesta Lombard L1 como:

$$\beta_{L1} := \beta(I) = \begin{cases} cI & \text{si } I < \delta \\ c\delta & \text{si } \delta \geq I, \end{cases} \quad (1)$$

donde δ representa el máximo nivel de intensidad de ruido al que responde el individuo (saturación).

Respuesta Lombard L2

En esta respuesta se considera que todo el tiempo se esta ejerciendo la adaptación acústica, entonces la tasa per-capita de la intensidad de señal emitida por un conoespecífico (cI) resulta en un incremento desacelerado, solo hasta la tasa máxima que permite la capacidad física, la cual se logra para altos niveles de intensidad de ruido. Es decir, la tasa de intensidad de ruido percibido es cada vez menor, hasta llegar a estabilizarse en un cierto valor (ver Fig. 3).

Implícitamente, la respuesta Lombard L1 solo considera el tiempo que demora en llegar el sonido del ruido de la fuente al hábitat del individuo. Esto se puede observar en la ecuación (1), donde si definimos dicho tiempo por T_f , entonces $T_f = 1$. Sin embargo, aquí también se considera el tiempo que demora el individuo para adaptarse a una cierta unidad de nivel de intensidad de ruido. Así, si definimos este tiempo por T_a , entonces el tiempo requerido para adaptarse al nivel de intensidad cI será el producto cIT_a . Ahora, el tiempo total (T) es:

$$T = 1 + cIT_a.$$

Luego, la ecuación (1) se transforma ahora en:

$$\beta = cI(T - \beta T_a).$$

Por lo tanto, se puede formular una función que representa la respuesta Lombard L2 como:

$$\beta_{L2} := \beta(I) = \frac{cIT}{1 + cIT_a}, \quad (2)$$

donde se observa que cuando $I \rightarrow +\infty$, entonces $\beta \rightarrow T/T_a$, es decir, T/T_a es el valor máximo de intensidad de señal emitida por un conoespecífico debido a sus limitaciones físicas y $1/cT_a$ es la tasa de saturación media, es decir, el nivel de intensidad de ruido para el cual el individuo responde emitiendo la mitad del nivel de intensidad de su máxima capacidad. Además, se observa que la rapidez de respuesta inicial al ruido depende fuertemente del grado de sensibilidad, pues:

$$\frac{\partial \beta}{\partial I}(0) = cT.$$

Respuesta Lombard L3

Este tipo de respuesta es más compleja que Lombard L2. Pues se considera que para niveles bajos de ruido la tasa de intensidad de señal emitida por un conoespecífico resulta en un incremento acelerado, solo hasta cuando la adaptación acústica empieza a ejercer, de modo que para altos niveles de ruido esta respuesta es similar a la respuesta Lombard L2. Es decir la tasa de intensidad de ruido percibido va en aumento solo hasta cuando hay ausencia de adaptación, a partir de allí el ruido percibido empieza a disminuir (ver Fig. 4).

Entonces, matemáticamente, podemos escribir:

$$\beta = [cI(T - \beta T_a)]cIT_a,$$

de donde se puede formular una función que represente este fenómeno, la cual se ha denominado respuesta Lombard L3, como:

$$\beta_{L3} := \beta(I) = \frac{c^2 I^2 T T_a}{1 + c^2 I^2 T_a^2}, \quad (3)$$

donde al igual que la respuesta Lombard L2, se observa que cuando $I \rightarrow +\infty$, entonces $\beta \rightarrow T/T_a$, y $1/cT_a$ es la tasa de saturación media. Además, el umbral de ruido para que empiece a ejercer la adaptación acústica es:

$$I_a = \frac{\sqrt{3}}{3cT_a}.$$

y el máximo nivel de ruido percibido es:

$$\frac{3\sqrt{3}cT}{8}.$$

EFFECTOS DE LA RESPUESTA LOMBARD EN LA DINÁMICA POBLACIONAL

En esta sección, se realiza simulaciones numéricas y se analiza gráficamente los efectos, de dos tipos diferentes de respuesta Lombard, sobre la dinámica de una población

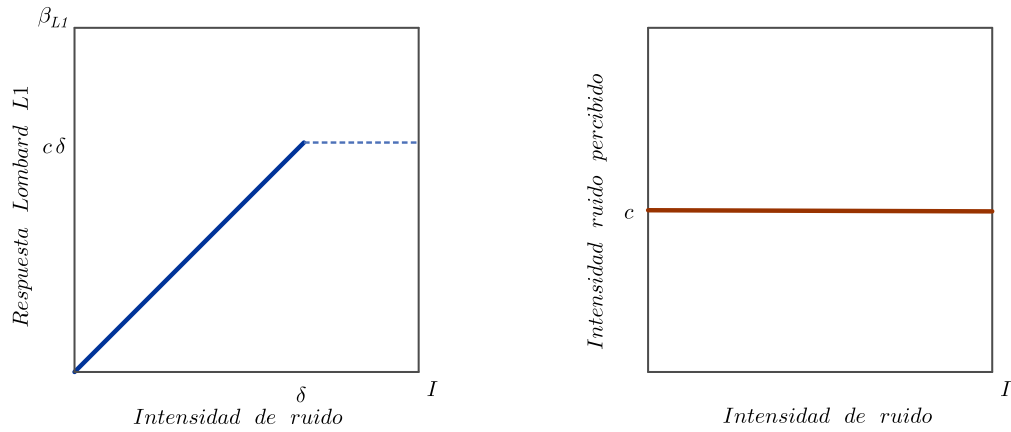


Figura 2: Respuesta Lombard L1. La intensidad de las señales acústicas aumentan proporcionalmente al aumento de la intensidad del ruido (línea azul). La proporción de intensidad de ruido percibido siempre es constante (línea roja).

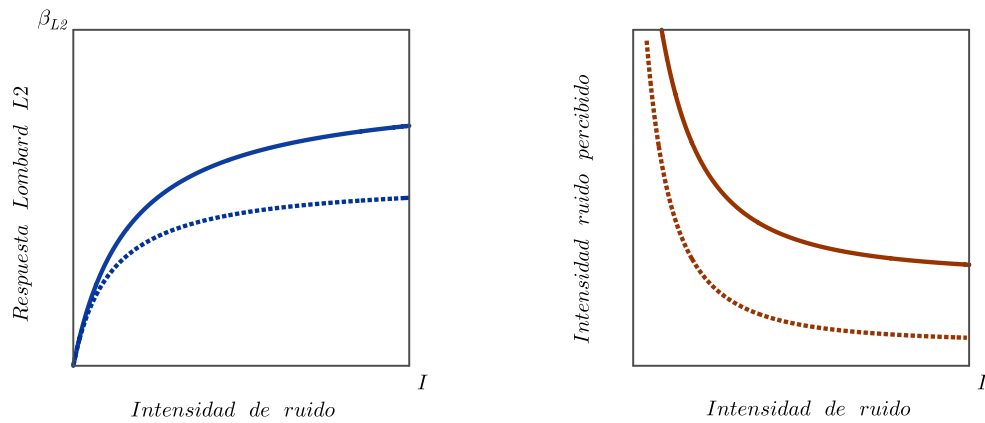


Figura 3: Respuesta Lombard L2. En una especie con un tiempo de adaptación (T_a). La intensidad de sus señales acústicas aumentan desaceleradamente con el ruido antropogénico hasta estabilizarse en un nivel de intensidad mayor (línea azul continua) que en una especie con tiempo de adaptación mayor (línea azul discontinua). Con un tiempo de adaptación menor la proporción de intensidad de ruido percibido va disminuyendo (línea roja continua) y es mayor que con un tiempo de adaptación mayor (línea roja discontinua).

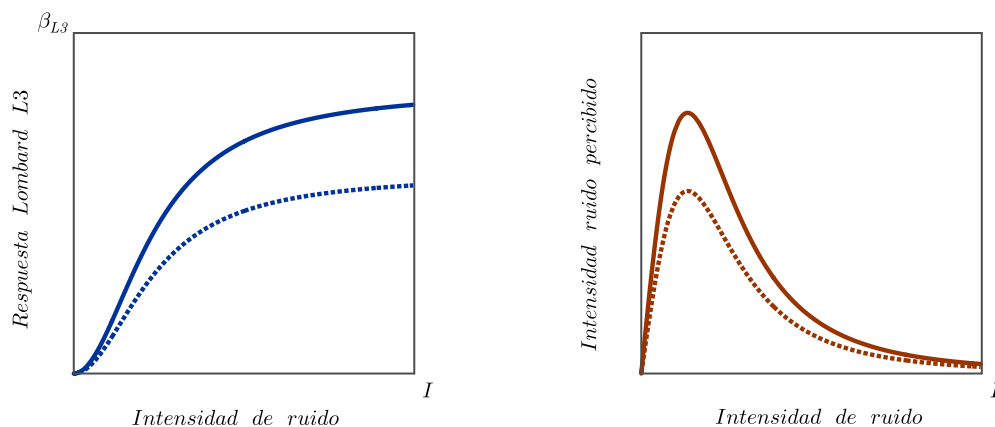


Figura 4: Efecto Lombard L3. En una especie con un tiempo de adaptación, T_a , el nivel de intensidad del umbral de ruido para que empiece a ejercer la adaptación acústica es mayor (línea azul continua) que en una especie con un tiempo de adaptación mayor (línea azul discontinua). La máxima proporción de intensidad de ruido percibido es mayor (línea roja continua) en una especie que demora menos tiempo en adaptarse al ruido que en una especie que demora más (línea roja discontinua).

monoespecífica.

Se considera el modelo matemático propuesto en (Ramírez-Carrasco et al., 2022a), que utiliza un sistema

de ecuaciones diferenciales no lineales y no autónomas para estudiar la persistencia poblacional de una población monoespecífica expuesta al ruido crítico. El ruido crítico se alimenta de una fuente antropogénica y en consecuencia por el efecto Lombard de otra fuente biológica generadora de señales acústicas autogeneradas por la población. El modelo simplificado es representado por el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{cases} N'(t) = (r_0 - dI - \lambda N)N \\ I'(t) = \alpha F(t) + \beta(I)N - \gamma I, \end{cases} \quad (4)$$

definido en el intervalo de tiempo $[0, \infty)$, con condiciones iniciales positivas dadas por $N(0) = N_0$ e $I(0) = I_0 > 0$. Las definiciones y unidades de las variables y parámetros del modelo (4) se resumen en la Tabla 1.

Para este análisis gráfico, se considera una especie arbitraria expuesta a un ruido cuasiperiódico con respuesta Lombard, cuyos valores de los parámetros demográficos se enuncian en la Tabla 2. Donde, además se observa que fijados los valores para los parámetros T y T_a la máxima intensidad de señales acústicas emitidas es T/T_a y la tasa de saturación media es $1/cT_a$, tanto para una respuesta Lombard L2 como para una respuesta Lombard L3.

TABLA 2: VALORES DE PARÁMETROS

$F(t)$	r_0	λ	α	γ	c	T	T_a
$0,3\cos(t) + 0,2\cos(\sqrt{2}t) + 0,6$	1	0,5	0,3	0,4	1	0,6	0,5

Cuando en el modelo el grado de afectación del ruido es bajo, es decir, $d = 0,1$. Entonces la población persiste. Si la población responde a este ruido antropogénico cuasiperiódico con una respuesta Lombard L2, representada por la función:

$$\beta(I) = \frac{0,6I}{1 + 0,5I},$$

se observa que la población se estabiliza más rápidamente en un valor ligeramente superior (ver Fig. 5) que si respondiera con una respuesta Lombard L3, representada por la función (ver Fig. 6):

$$\beta(I) = \frac{0,3I^2}{1 + 0,25I^2}.$$

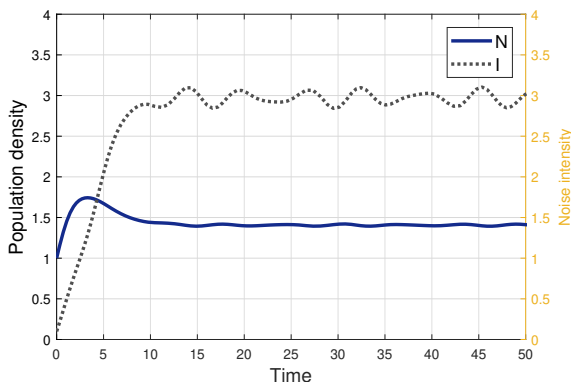


Figura 5: Persistencia de la especie con una respuesta Lombard L2

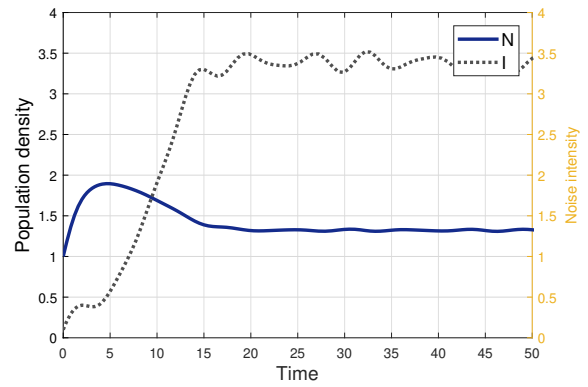


Figura 6: Persistencia de la especie con una respuesta Lombard L3

Cuando en el modelo el grado de afectación del ruido es alto, $d = 2$. Entonces la población va hacia la extinción. Sin embargo, la población se extingue más rápidamente cuando responde al ruido con una respuesta Lombard L2 (ver Fig. 7) que con una respuesta Lombard L3 (ver Fig. 8).

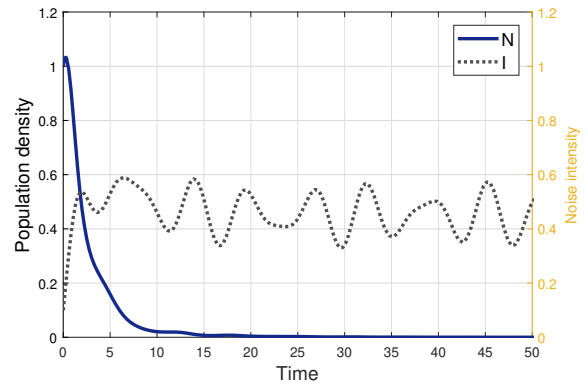


Figura 7: Extinción de la especie con una respuesta Lombard L2

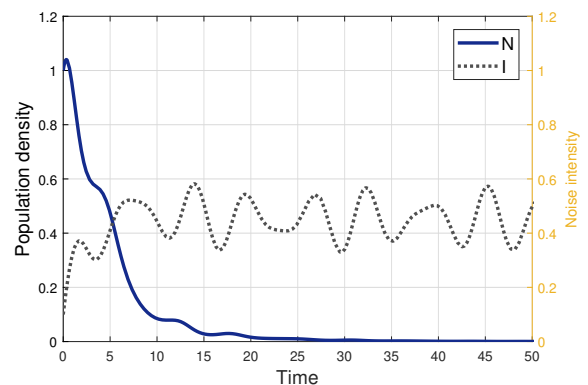


Figura 8: Extinción de la especie con una respuesta Lombard L3

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Existe mucha evidencia empírica que demuestra que el efecto Lombard esta presente en muchas especies (Luo et al., 2018; Brackenbury, 1979; Calder III, 1990; Holt et al., 2009; Helble et al., 2020). Así mismo, también existen evidencias que demuestran que el modo de respuesta Lombard puede diferir (Luo et al., 2017a; Hardman et al.,

TABLA 1: BIOLOGICAL MEANING OF VARIABLES AND PARAMETERS

Symbol	Definition	unit
N	Population abundance	n
I	Noise intensity to which an individual is exposed	w/m^2
$F(t)$	Anthropogenic noise intensity at time t	$t^{-1}(w/m^2)$
$\beta(I)$	Intensity of the song emitted by a conspecific with Lombard effect	$t^{-1}n^{-1}(w/m^2)$
r_0	Intrinsic growth rate	t^{-1}
d	Degree to which noise affects the population	$t^{-1}(w/m^2)^{-1}$
λ	Intraspecific competition coefficient	$t^{-1}n^{-1}$
γ	Noise attenuation coefficient for different atmospheric mechanisms	t^{-1}

2017; Luo et al., 2017b). Sugiriendo que la plasticidad de las señales acústicas, modulado quizás por la experiencia sensorial, la habituación o la adaptación acústica, proporcionan diferentes tipos de respuesta Lombard (Groves y Thompson, 1970; Morton, 1975; Thompson, 2009).

Este trabajo propone, mediante un enfoque teórico-matemático, tres nuevas definiciones para tres tipos diferentes de respuestas Lombard. La primera respuesta Lombard L1, propone que el aumento de las señales acústicas en respuesta al aumento del ruido es simplemente lineal. La segunda respuesta Lombard L2, considera que la especie experimenta adaptación acústica y en consecuencia se produce un aumento desacelerado de las señales acústicas en respuesta al aumento del ruido. La respuesta Lombard L3, propone que en un inicio el aumento de las señales acústicas es acelerado para luego a partir de cierto nivel de ruido comportarse como la respuesta Lombard L2. Finalmente, se analiza gráficamente los efectos de estas respuestas Lombard sobre la persistencia de una población mono-específica expuesta al ruido crítico y cuasiperiódico.

En conclusión, debido al innegable potencial de afectar la demografía y que cada vez más hay preocupación por incluir el ruido antropogénico en los planes de gestión, también es relevante estudiar la respuesta de las especies frente a esta amenaza omnipotente. En consecuencia, se cree que este trabajo puede servir para arrojar luz sobre los diferentes modos de respuesta Lombard y poner de relieve cuestiones importantes para futuras investigaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- Barber, J. R., Crooks, K. R., y Fristrup, K. M. (2010). "The costs of chronic noise exposure for terrestrial organisms". *Trends in ecology & evolution*, 25(3):180–189.
- Brackenbury, J. (1979). "Power capabilities of the avian sound-producing system". *Journal of Experimental Biology*, 78(1):163–166.
- Brown, N. A., Halliday, W. D., Balshine, S., y Juanes, F. (2021). "Low-amplitude noise elicits the lombard effect in plainfin midshipman mating vocalizations in the wild". *Animal Behaviour*, 181:29–39.
- Brumm, H. (2004). "The impact of environmental noise on song amplitude in a territorial bird". *Journal of animal ecology*, pp. 434–440.
- Brumm, H. y Todt, D. (2002). "Noise-dependent song amplitude regulation in a territorial songbird". *Animal behaviour*, 63(5):891–897.
- Brumm, H. y Zollinger, S. A. (2017). "Vocal plasticity in a reptile". *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 284(1855):20170451.
- Calder III, W. A. (1990). "The scaling of sound output and territory size: Are they matched?" *Ecology*, 71(5):1810–1816.
- Das, A. y Samanta, G. (2018). "Stochastic prey-predator model with additional food for predator". *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 512:121–141.
- Dooling, R. J., Leek, M., y West, E. (2009). "Predicting the effects of masking noise on communication distance in birds." *The Journal of the Acoustical Society of America*, 125(4):2517–2517.
- Erbe, C., Reichmuth, C., Cunningham, K., Lucke, K., y Dooling, R. (2016). "Communication masking in marine mammals: A review and research strategy". *Marine pollution bulletin*, 103(1-2):15–38.
- Farina, A. (2017). "The ecological effects of noise on species and communities". *Ecoacoustics: the ecological role of sounds*, pp. 95–107.
- Filadelfo, R., Mintz, J., Michlovich, E., D'Amico, A., Tyack, P. L., y Ketten, D. R. (2009). "Correlating military sonar use with beaked whale mass strandings: What do the historical data show?" *Aquatic mammals*, 35(4).
- Groves, P. M. y Thompson, R. F. (1970). "Habituation: a dual-process theory." *Psychological review*, 77(5):419.
- Hardman, S. I., Zollinger, S. A., Koselj, K., Leitner, S., Marshall, R. C., y Brumm, H. (2017). "Lombard effect onset times reveal the speed of vocal plasticity in a songbird". *Journal of experimental biology*, 220(6):1065–1071.
- Helble, T. A., Guazzo, R. A., Martin, C. R., Durbach, I. N., Alongi, G. C., Martin, S. W., Boyle, J. K., y Henderson, E. E. (2020). "Lombard effect: Minke whale boing call source levels vary with natural variations in ocean noise". *The Journal of the Acoustical Society of America*, 147(2):698–712.
- Holt, D. E. y Johnston, C. E. (2014). "Evidence of the lombard effect in fishes". *Behavioral Ecology*, 25(4):819–826.
- Holt, M. M., Noren, D. P., Veirs, V., Emmons, C. K., y Veirs, S. (2009). "Speaking up: Killer whales (orcinus orca) increase their call amplitude in response to vessel noise". *The Journal of the Acoustical Society of America*, 125(1):EL27–EL32.
- Kunc, H. P. y Schmidt, R. (2019). "The effects of anthropogenic noise on animals: a meta-analysis". *Biology Letters*, 15(11):20190649.
- Lombard, E. (1911). "Le signe de l'elevation de la voix". *Ann. Mal. de L'Oreille et du Larynx*, pp. 101–119.
- Luczkovich, J. J., Krahforst, C. S., Kelly, K. E., y Sprague, M. W. (2016). "The lombard effect in fishes: How boat noise impacts oyster toadfish vocalization amplitudes in natural experiments". En: *Proceedings of Meetings on Acoustics 4ENAL*, volumen 27. Acoustical Society of America, pp. 010035.
- Luo, J., Hage, S. R., y Moss, C. F. (2018). "The lombard effect: from acoustics to neural mechanisms". *Trends in neurosciences*, 41(12):938–949.
- Luo, J., Kothari, N. B., y Moss, C. F. (2017a). "Sensorimotor integration on a rapid time scale". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(25):6605–6610.
- Luo, J., Lingner, A., Firzlaff, U., y Wiegrebe, L. (2017b). "The lombard effect emerges early in young bats: implications for the development of audio-vocal integration". *Journal of Experimental Biology*, 220(6):1032–1037.
- McClure, C., Ware, H., Carlisle, J., y Barber, J. (2017). "Noise from a phantom road experiment alters the age structure of a community of migrating birds". *Animal conservation*, 20(2):164–172.
- McClure, C. J., Ware, H. E., Carlisle, J., Kaltenecker, G., y Barber, J. R. (2013). "An experimental investigation into the effects of traffic noise on distributions of birds: avoiding the phantom road". *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 280(1773):20132290.
- Morton, E. S. (1975). "Ecological sources of selection on avian sounds". *The American Naturalist*, 109(965):17–34.
- Nedelec, S. L., Radford, A. N., Simpson, S. D., Nedelec, B., Lecchini, D., y Mills, S. C. (2014). "Anthropogenic noise playback impairs embryonic development and increases mortality in a marine invertebrate". *Scientific Reports*, 4(1):1–4.

- [28] Oberweger, K. y Goller, F. (2001). "The metabolic cost of birdsong production". *Journal of Experimental Biology*, 204(19):3379–3388.
- [29] Organization, W. H. et al. (2011). *Burden of disease from environmental noise: Quantification of healthy life years lost in Europe*. World Health Organization. Regional Office for Europe.
- [30] Parris, K. M. y Schneider, A. (2009). "Impacts of traffic noise and traffic volume on birds of roadside habitats". *Ecology and society*, 14(1).
- [31] Potvin, D. A. y MacDougall-Shackleton, S. A. (2015). "Traffic noise affects embryo mortality and nestling growth rates in captive zebra finches". *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological Genetics and Physiology*, 323(10):722–730.
- [32] Ramírez-Carrasco, C., Córdova-Lepe, F., Moreno-Gómez, F., y Velásquez, N. (2022a). "A mathematical model for the impact of noise on population dynamics of a single species experiencing lombard effect". *Ecological Modelling*, 470:110022.
- [33] Ramírez-Carrasco, C., Córdova-Lepe, F., y Velásquez, N. (2022b). "A simple stability analysis for a mathematical model of migration due to noise and resources". *Mathematics*, 10(19):3485.
- [34] Read, J., Jones, G., y Radford, A. N. (2014). "Fitness costs as well as benefits are important when considering responses to anthropogenic noise". *Behavioral Ecology*, 25(1):4–7.
- [35] Römer, H. (2013). "Masking by noise in acoustic insects: problems and solutions". En: *Animal communication and noise*, pp. 33–63. Springer.
- [36] Sementili-Cardoso, G. y Donatelli, R. J. (2021). "Anthropogenic noise and atmospheric absorption of sound induce amplitude shifts in the songs of southern house wren (*troglodytes aedon musculus*)". *Urban Ecosystems*, 24(5):1001–1009.
- [37] Simpson, S. D., Radford, A. N., Nedelec, S. L., Ferrari, M. C., Chivers, D. P., McCormick, M. I., y Meekan, M. G. (2016). "Anthropogenic noise increases fish mortality by predation". *Nature communications*, 7(1):1–7.
- [38] Sinnott, J. M., Stebbins, W. C., y Moody, D. B. (1975). "Regulation of voice amplitude by the monkey". *The Journal of the Acoustical Society of America*, 58(2):412–414.
- [39] Slabbekoorn, H. y Peet, M. (2003). "Birds sing at a higher pitch in urban noise". *Nature*, 424(6946):267–267.
- [40] Spagnolo, B., Fiasconaro, A., y Valenti, D. (2003). "Noise induced phenomena in lotka-volterra systems". *Fluctuation and Noise Letters*, 3(02):L177–L185.
- [41] Swaddle, J. P., Francis, C. D., Barber, J. R., Cooper, C. B., Kyba, C. C., Dominoni, D. M., Shannon, G., Aschehoug, E., Goodwin, S. E., Kawahara, A. Y., et al. (2015). "A framework to assess evolutionary responses to anthropogenic light and sound". *Trends in ecology & evolution*, 30(9):550–560.
- [42] Thompson, R. F. (2009). "Habituation: a history". *Neurobiology of learning and memory*, 92(2):127.
- [43] Upadhyay, R., Mukhopadhyay, A., y Iyengar, S. (2007). "Influence of environmental noise on the dynamics of a realistic ecological model". *Fluctuation and Noise Letters*, 7(01):L61–L77.
- [44] Warren, P. S., Katti, M., Ermann, M., y Brazel, A. (2006). "Urban bioacoustics: it's not just noise". *Animal behaviour*, 71(3):491–502.
- [45] Zollinger, S. A. y Brumm, H. (2015). "Why birds sing loud songs and why they sometimes don't". *Animal Behaviour*, 105:289–295.