

Análisis Computacional de Coros de *Eleutherodactylus eileenae* (Dunn, 1926): Inferencia de Redes desde Señales Bioacústicas.



Trabajo de Diploma presentado en opción al título de Licenciado en Ciencia de la Computación.

Autor: Daniel Machado Pérez.

Tutores: Asesores:

Dr. Roberto Mulet.
Dr. Roberto Alonso.

Dr. Milton García.
Lic. José J. Díaz.



Preliminares.

• Eleutherodactylus eileenae Dunn, 1926 (Colín) es una especie de rana cubana que habita la zona forestal del Occidente y Centro del país.

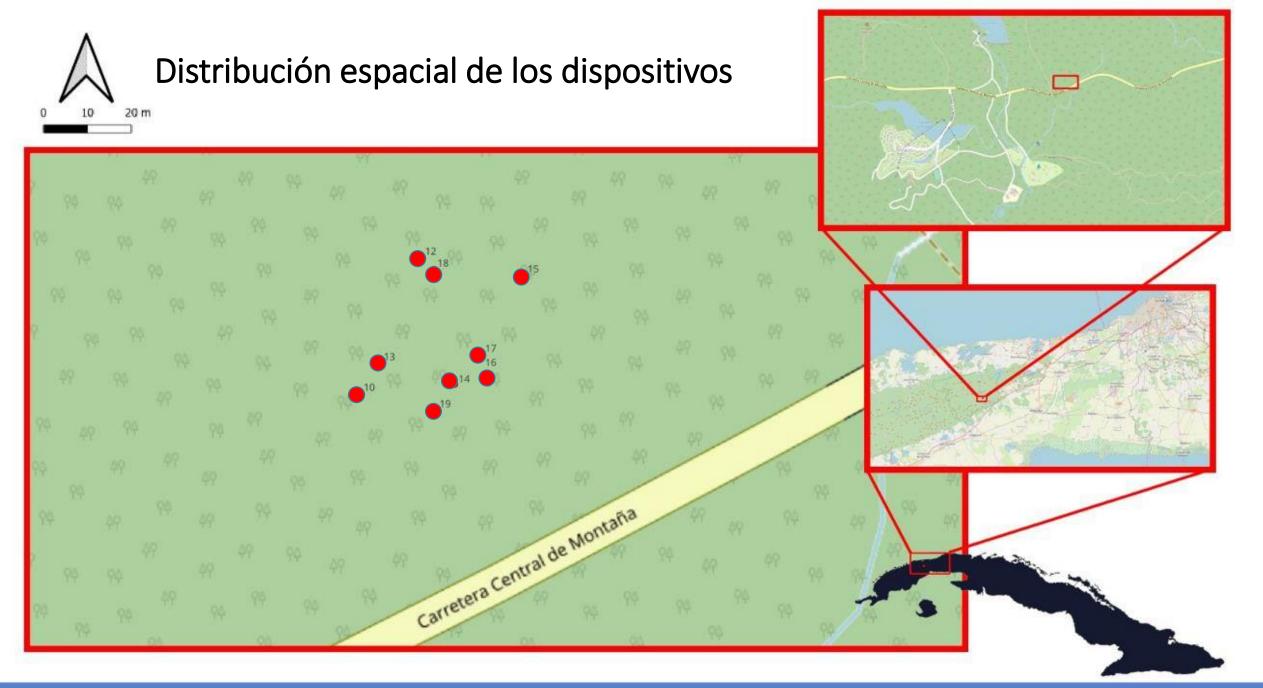
• Su canto característico consiste en una señal que tiene 2 momentos: un momento de baja frecuencia (CO) y uno de alta frecuencia (LIN).

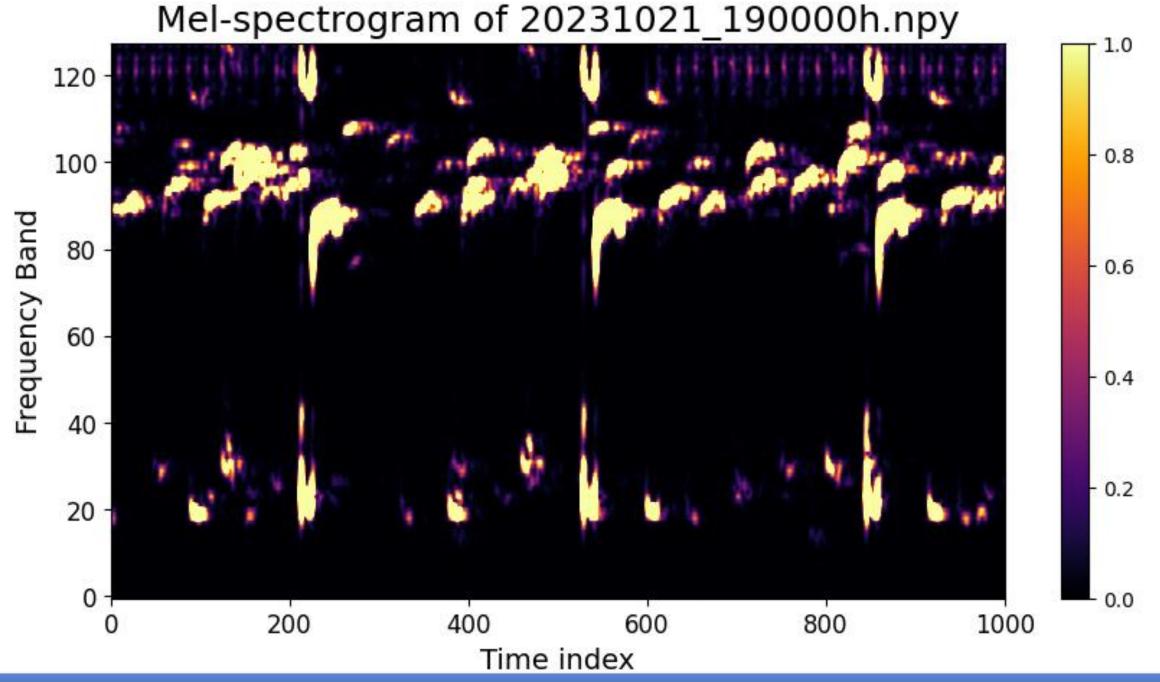
• Así se escucha un Colín vocalizando:

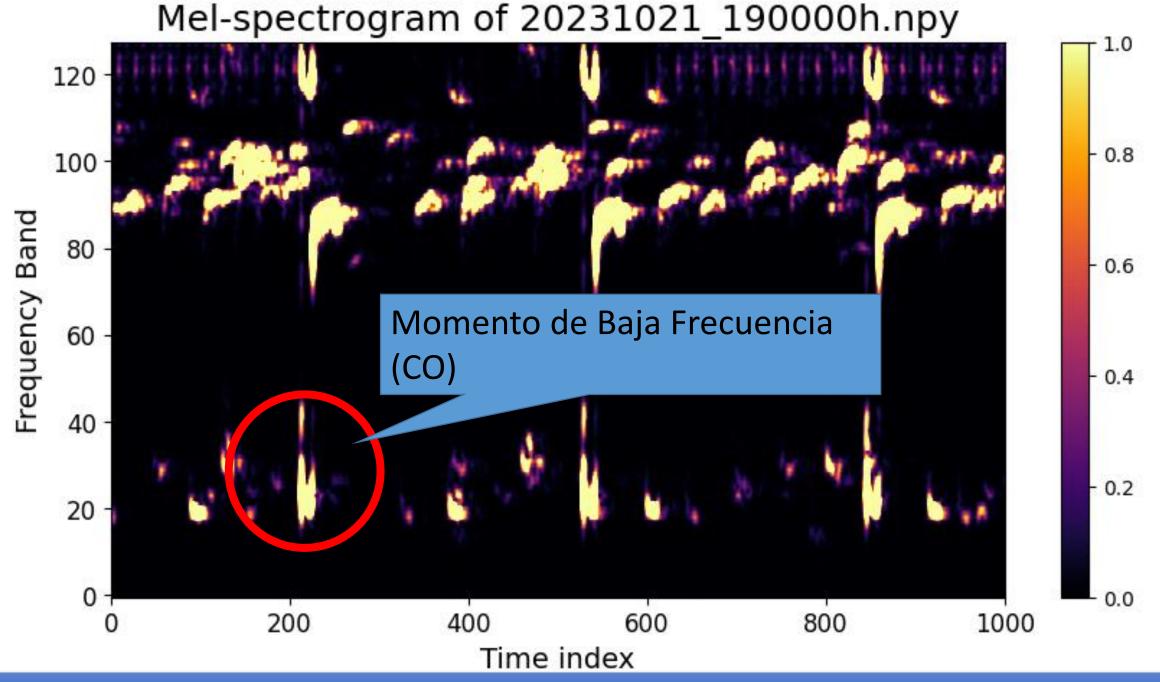


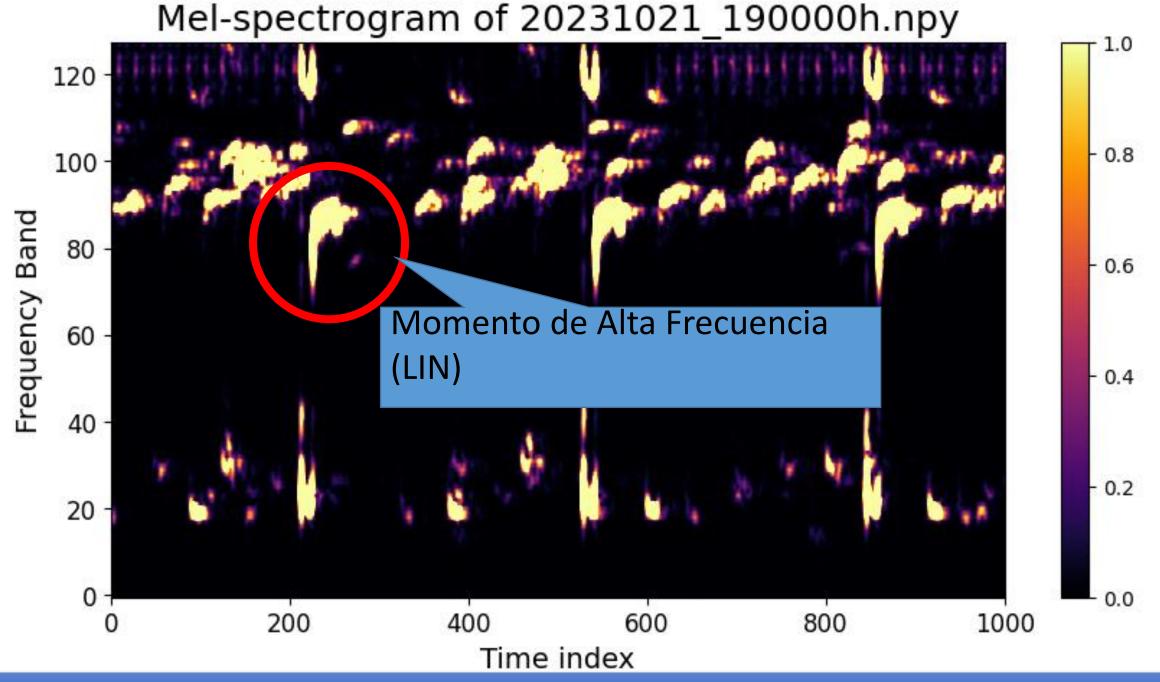
• Así se escuchan las grabaciones de coros de Colines:









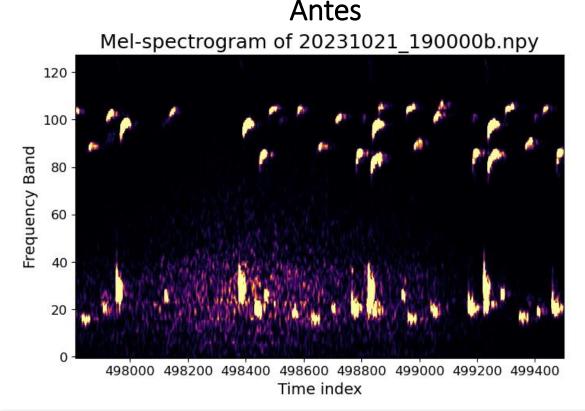


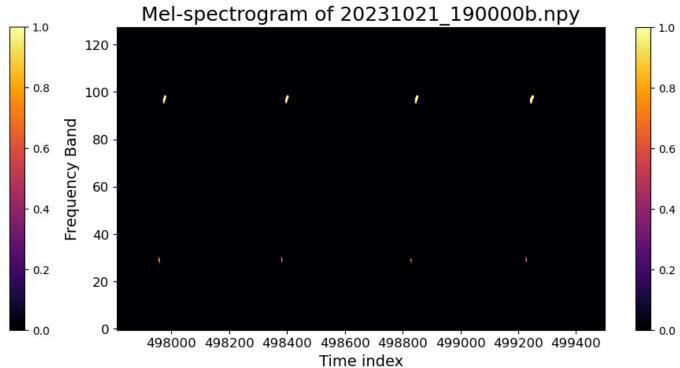
 Motivación: Se requiere un procedimiento automatizado que permita estudiar interacciones acústicas de forma escalable.

 Objetivo general: Desarrollar y validar un flujo computacional que permita reconstruir la dinámica de los coros de E. eileenae y cuantificar su sincronización y causalidad.

Eliminación de Ruido.

- Atenuar interferencias puntuales (vocalizaciones de otros individuos, clics mecánicos) y ruidos de banda ancha (motores de vehículos, grillos, viento).
- Poda espectral (*spectral pruning*) basada en el percentil 99.9 de la amplitud por frecuencia.





Después

Sincronización.

- Localizar puntos de máximos locales de los Mel-espectrogramas (t, f).
- Construir histogramas de los índices temporales de los máximos.
- Aplicar Correlación Cruzada entre los histogramas de cada par de archivos.

Simple Cross Correlation:
$$\sum_{i=0}^{n} a_i b_i$$

donde a_i y b_i son los valores del primer y segundo vector respectivamente, en la misma posición i.

-												
	0	1	0	1	0	1	1	1				
				1	0	1	1	0	1	0	1	Resultado: 3

 Detección de cantos. Algoritmo basado en energías relativas.

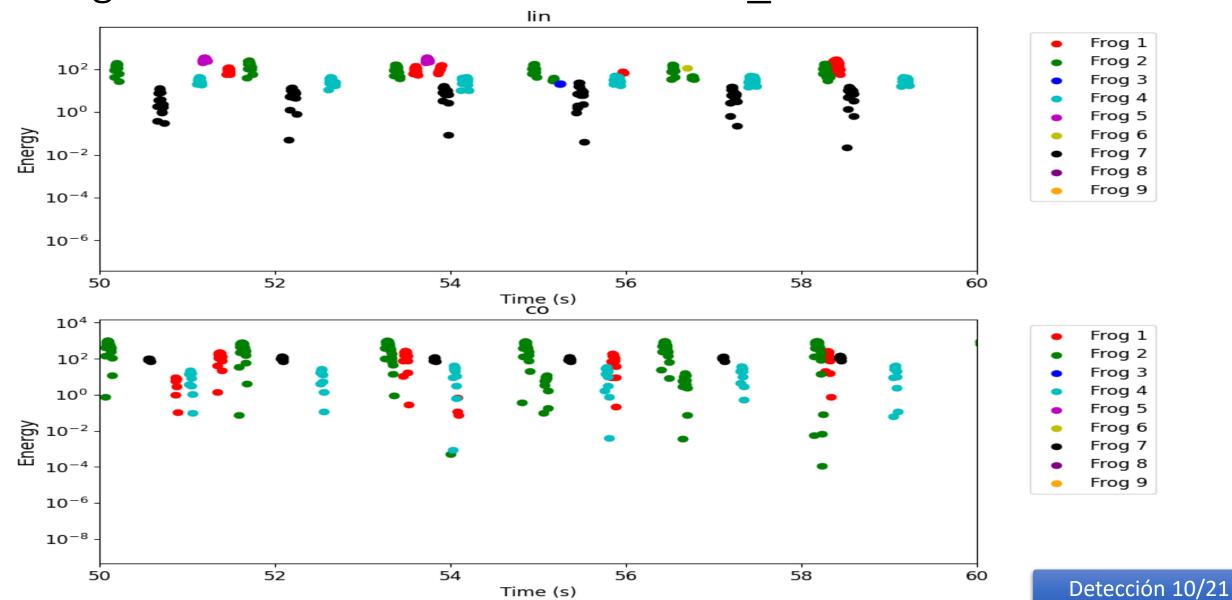
Supuesto: Para cada micrófono, los cantos del individuo más cercano deben ser registrados con las mayores energías relativas a dicho micrófono.

Idea del algoritmo:

- Seleccionar aleatoriamente un micrófono (k).
- Identificar en *k* la mayor energía, guardarla, y eliminar la información de ese canto de todas las grabaciones.
- Repetir hasta que se vacíen los vectores originales.

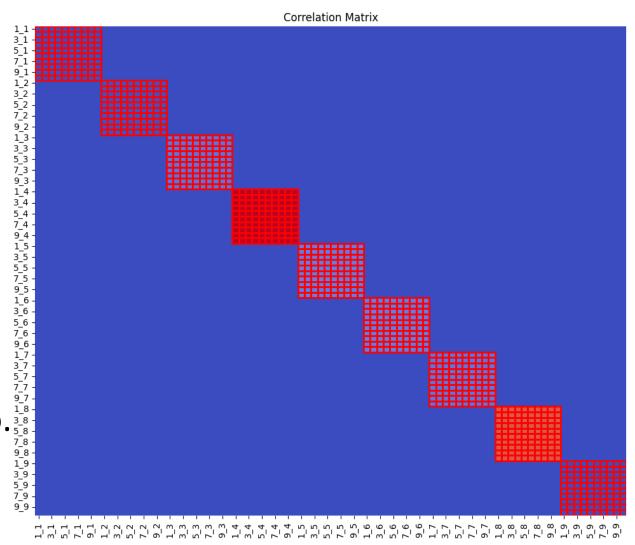
- Detección de cantos. Algoritmo basado en clustering espectro-temporal.
 - 1. Hallar máximos locales (t, f).
 - 2. Se filtran los máximos que podrían ser parejas de "CO" y "LIN".
 - 3. A las parejas (t_{CO}, f_{CO}) y (t_{LIN}, f_{LIN}) se les aplica *clustering* aglomerativo sobre las frecuencias.
 - 4. Se selecciona la secuencia cuyo grupo presenta la potencia media de canto más alta, asignándola al micrófono correspondiente.
 - 5. Se descartan los canales con un número de máximos inferior al umbral mínimo, declarándolos sin detección de Colín.

 Resultados. Obtención de secuencias de cantos sobre un fragmento de los datos de 20231021 190000.

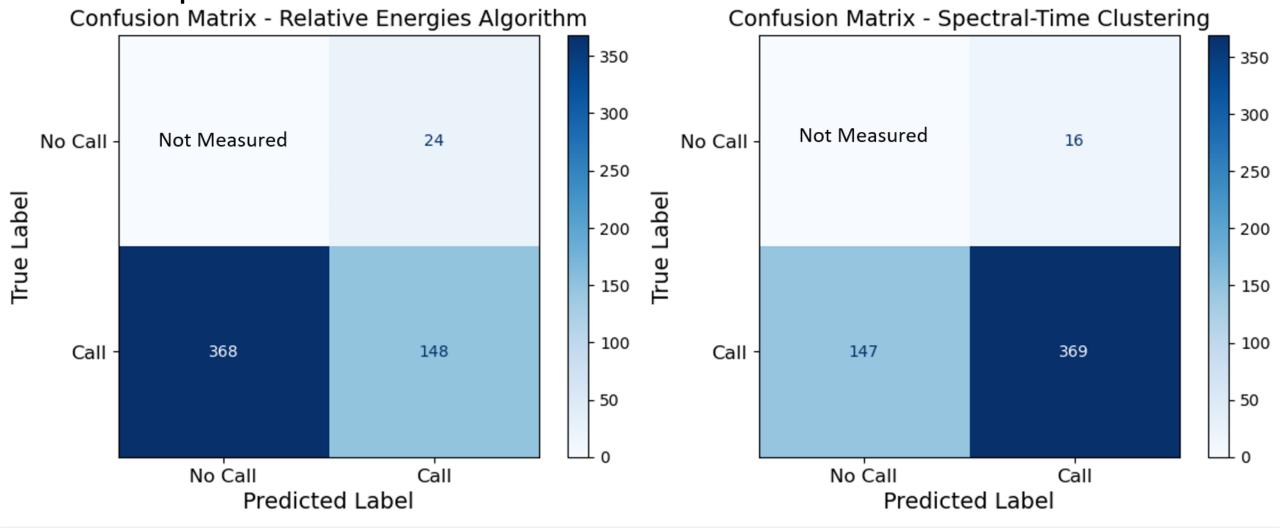


Consistencia de resultados.

- Se realizan *n* ejecuciones independientes sobre el mismo conjunto de datos.
- Se construye una matriz de correlación cruzada entre todos los vectores provenientes de las diferentes ejecuciones.
- Se agrupan las filas y columnas por vectores de distintas corridas correspondientes al mismo micrófono.
- Se resaltan en rojo los n mayores valores de correlación de cada fila.



Evaluación de resultados. Comparación con etiquetado manual.

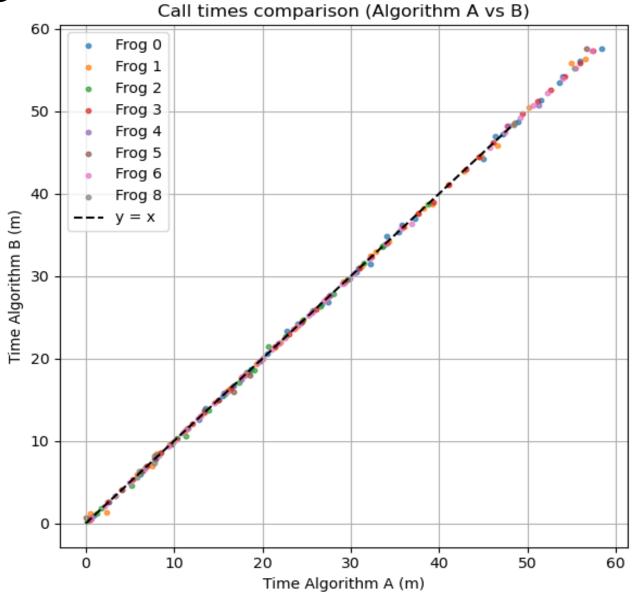


Comparación entre algoritmos.

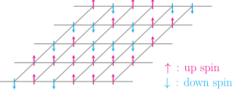
Algoritmo A: energías relativas.

Algoritmo B: clustering espectro-temporal.

- Comparación de tiempos de detección de cantos.
- Coeficientes de determinación \mathbb{R}^2 con valores entre 0.99 y 1.00.



Interacciones. Modelo de Ising.¹



- Red de espines (Colines) con dos posibles estados $\sigma_i \in \{-1, +1\}$ (silencio o vocalización).
- Interacciones (J_{ij}) y campo externo (h_i) .
- Distribución de probabilidad: Boltzman.

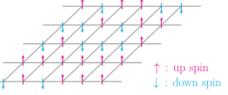
$$P(\sigma) = \frac{1}{Z} exp\left(\sum_{i < j} J_{ij}\sigma_i\sigma_j + \sum_i h_i\sigma_i\right)$$

• Z: Función de partición que garantiza la normalización.

Usualmente el cálculo de Z no es computacionalmente factible por el tamaño del sistema.

[1] Ising (1925)

Interacciones. Modelo de Ising.



 $\sigma = (\sigma_1, ..., \sigma_N)$, donde, N = 9 representa una configuración global del sistema.

Problema: Dado un conjunto de configuraciones $\{\sigma^{(1)}, ..., \sigma^{(M)}\}$, encontrar los parámetros J_{ij} y h_i que maximizan la verosimilitud del modelo.

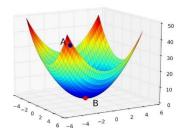
$$L(J,h) = \sum_{m=1}^{M} \log P(\sigma^{(m)}),$$

cuyo gradiente con respecto a J_{ij} se expresa como:

$$\frac{\delta L}{\delta J_{ij}} = \left\langle \sigma_i \sigma_j \right\rangle_{datos} - \left\langle \sigma_i \sigma_j \right\rangle_{modelo}$$

Lo mismo aplica para para los gradientes respecto a h_i .

Descenso por Gradiente.



Se puede aplicar Descenso por Gradiente para inferir los parámetros J_{ij} y h_i que mejor expliquen las interacciones observadas.

Las actualizaciones se realizan según las siguientes reglas:

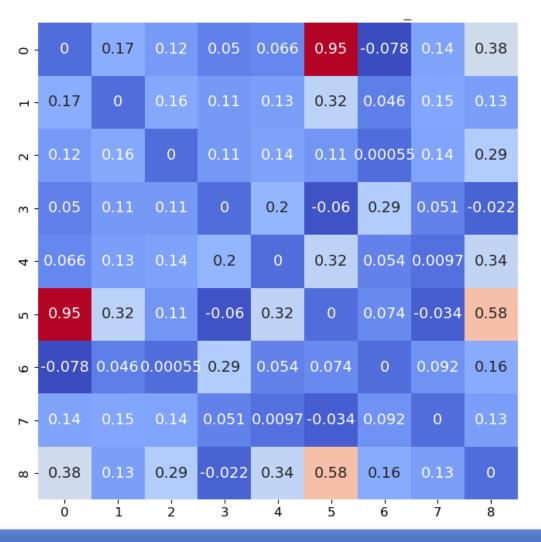
$$h_{i} \leftarrow h_{i} + \eta(\langle \sigma_{i} \rangle_{datos} - \langle \sigma_{i} \rangle_{modelo}),$$

$$J_{ij} \leftarrow J_{ij} + \eta\left(\langle \sigma_{i} \sigma_{j} \rangle_{datos} - \langle \sigma_{i} \sigma_{j} \rangle_{modelo}\right) - \eta \lambda J_{ij},$$

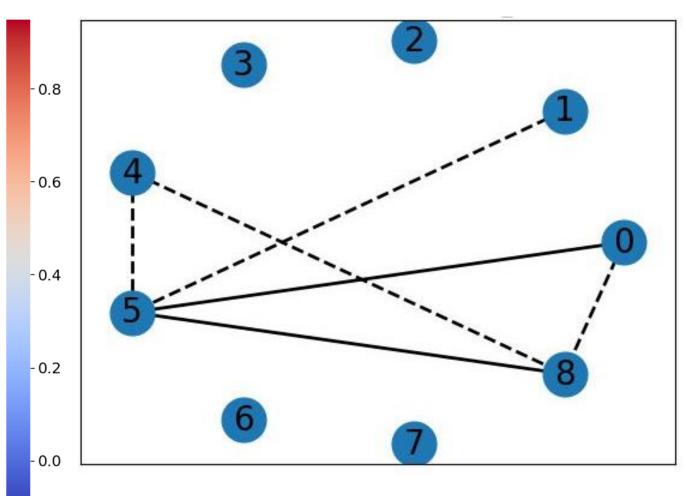
- η : tasa de aprendizaje.
- λ: coeficiente de regularización para evitar sobreajuste y favorecer soluciones más estables.

Resultados. Grabaciones del 20231021_190000.

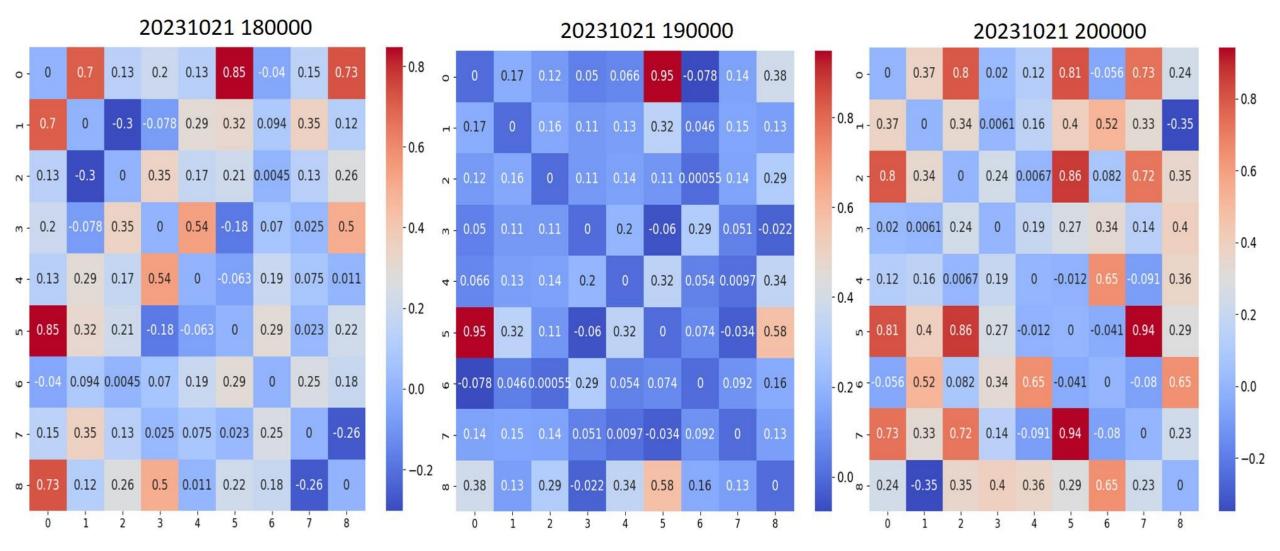




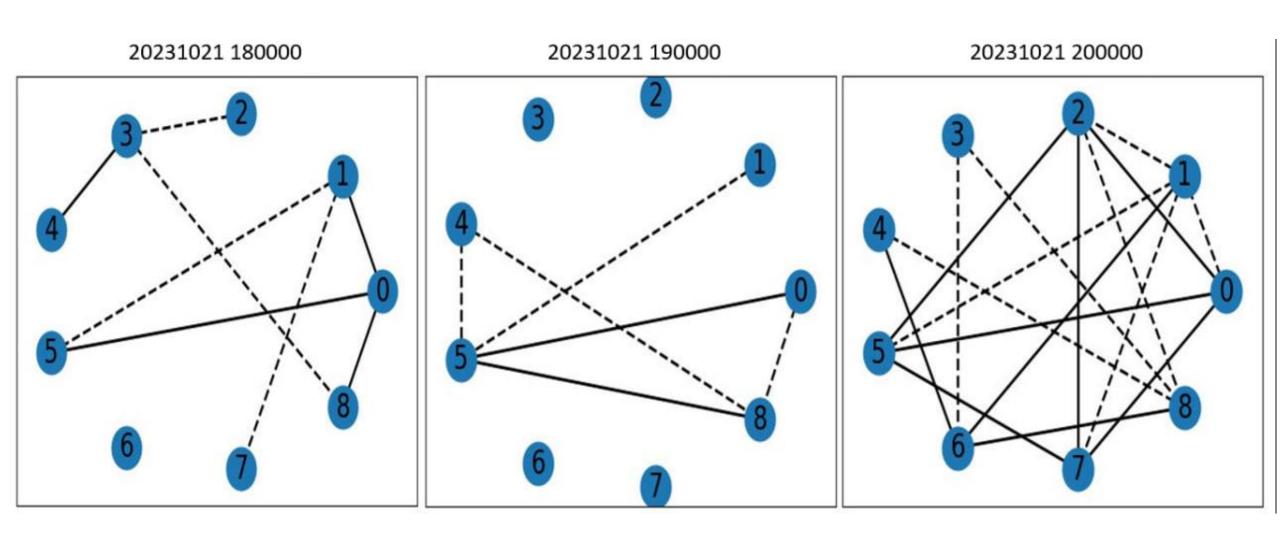
Grafo de interacciones



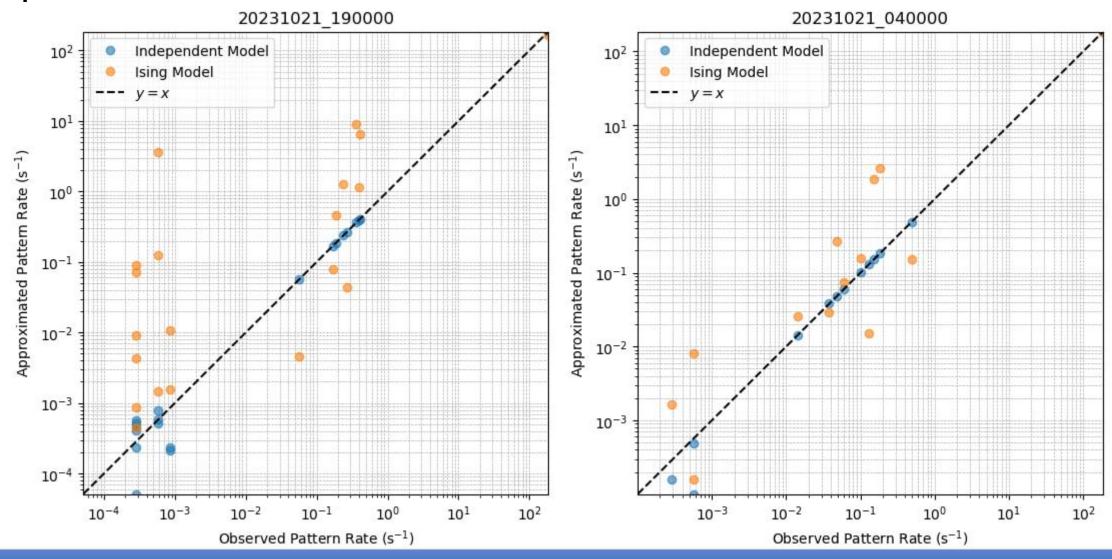
Persistencia de algunas interacciones en el tiempo.



Persistencia de algunas interacciones en el tiempo



 Capacidad de predecir la tasa de aparición de patrones de cantos.



Conclusiones

- Se desarrolló y validó un flujo computacional automatizado para el análisis de coros de *Eleutherodactylus eileenae*.
- La eliminación de ruido y sincronización produjeron un dataset "limpio".
- Se propusieron algoritmos consistentes para detectar y asignar cantos.
- Se infirieron dos modelos de interacciones acústicas: el modelo Independiente y el modelo de Ising.
- La tesis representa un avance significativo en el estudio de *Eleutherodactylus* eileenae en Cuba.



Análisis Computacional de Coros de *Eleutherodactylus eileenae* (Dunn, 1926): Inferencia de Redes desde Señales Bioacústicas.



Trabajo de Diploma presentado en opción al título de Licenciado en Ciencia de la Computación.

Autor: Daniel Machado Pérez.

Tutores: Asesores:

Dr. Roberto Mulet.
Dr. Roberto Alonso.

Dr. Milton García.
Lic. José J. Díaz.



Preguntas del Oponente

- 1. ¿Cómo evaluar la generalización de las heurísticas?
- 2. Si el modelo *baseline* aparentemente da mejores resultados, ¿por qué buscar complejizar aún más la propuesta?
- 3. ¿Cómo validar el resultado final contra el problema supervisado de asignar cada señal a cada fuente?
- 4. ¿Qué se concluye acerca de la hipótesis de co-emisión e inhibición?

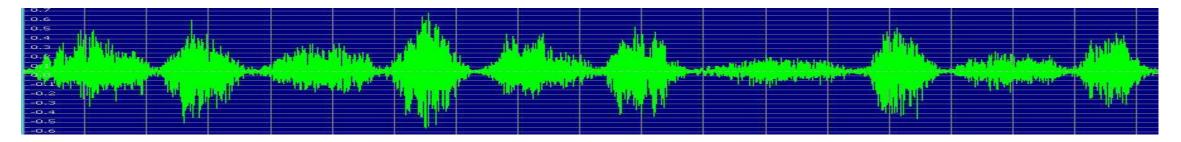
● 1. ¿Cómo evaluar la generalización de las heurísticas?

Métodos que se probaron en la tesis:

- Análisis de consistencia entre ambos algoritmos.
- Análisis de validación con datos etiquetados manualmente.

Métodos que se probarán en el futuro:

- Diseñar una simulación para generar corpus sintéticos que exploten las potencialidades de las heurísticas (posiciones de micrófonos y ranas, atenuación y delay del sonido, características de cantos, ruido).
- Aplicar algoritmos en fragmentos de los audios y en audios completos. Probar consistencia entre los resultados.



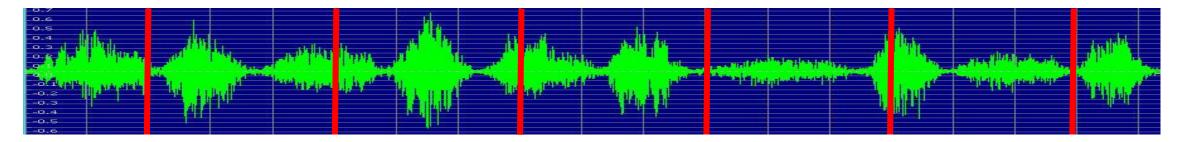
● 1. ¿Cómo evaluar la generalización de las heurísticas?

Métodos que se probaron en la tesis:

- Análisis de consistencia entre ambos algoritmos.
- Análisis de validación con datos etiquetados manualmente.

Métodos que se probarán en el futuro:

- Diseñar una simulación para generar corpus sintéticos que exploten las potencialidades de las heurísticas (posiciones de micrófonos y ranas, atenuación y delay del sonido, características de cantos, ruido).
- Aplicar algoritmos en fragmentos de los audios y en audios completos. Probar consistencia entre los resultados.



- 2. Si el modelo baseline aparentemente da mejores resultados, ¿por qué buscar complejizar aún más la propuesta?
 - En casi todas las especies arborícolas cubanas del género *Eleutherodactylus*, los machos vocalizan en grandes grupos durante la temporada de reproducción.
 - Los biólogos expertos piensan que en el caso de los Colines se forman coros (interacciones).
 - En Cuba no existen estudios previos sobre interacciones en grupos de anuros.
 - Es conocido en la literatura que muchas especies de anuros que forman coros, modifican la dinámica de sus cantos para evitar solapamientos.

 2. Si el modelo baseline aparentemente da mejores resultados, ¿por qué buscar complejizar aún más la propuesta?

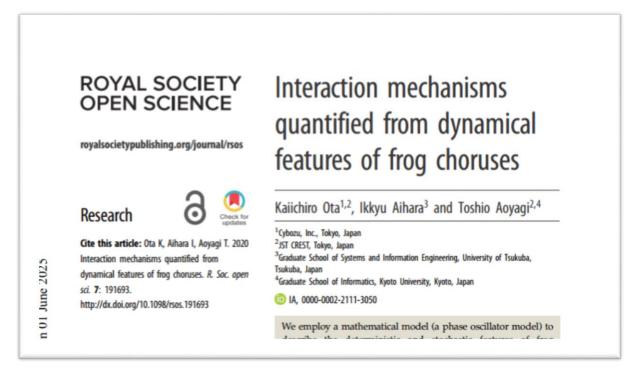
Wells & Schwartz (2007). The behavioral ecology of anuran communication

"La interacción entre machos a través de llamadas es un proceso dinámico y las relaciones de sincronización suelen ser fluidas y cambiar en respuesta a la acústica ambiental o al nivel de competencia entre machos."

 2. Si el modelo baseline aparentemente da mejores resultados, ¿por qué buscar complejizar aún más la propuesta?

Ota et al. (2020). Interaction mechanisms quantified from dynamical features of frog choruses.

"Nuestro análisis (...) sugiere una estrategia de comportamiento en la que las ranas macho atienden selectivamente a una rana macho menos atractiva (...) para anunciar de manera más efectiva su atractivo superior para las hembras."

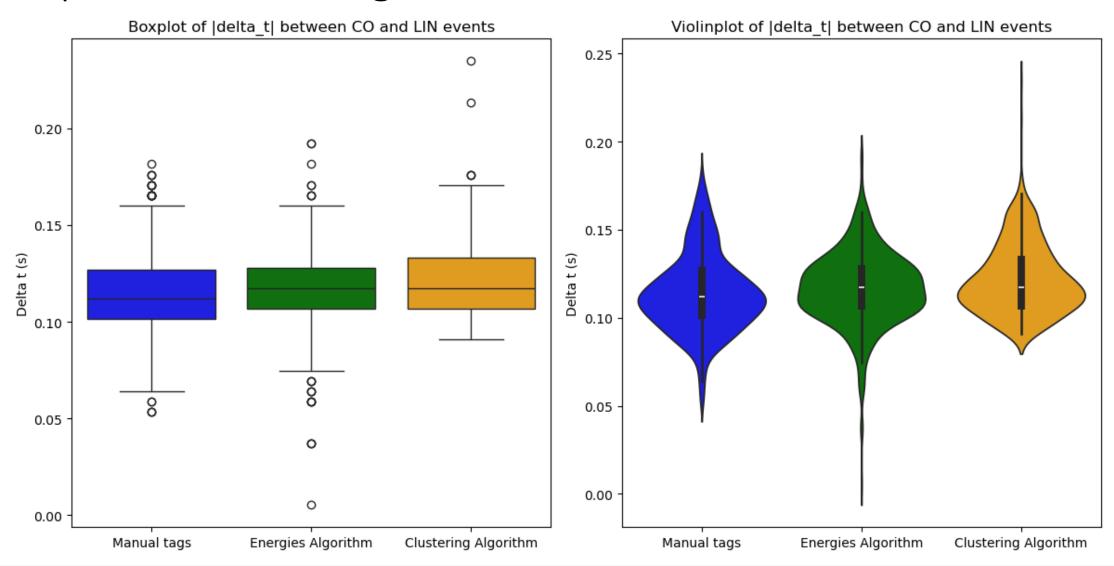


2. Si el modelo baseline aparentemente da mejores resultados,
 ¿por qué buscar complejizar aún más la propuesta?

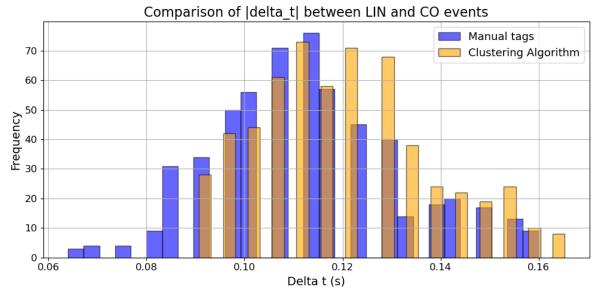
- Se observó persistencia de algunas interacciones.
- El modelo estándar de Ising asume que el sistema biológico está en equilibrio termodinámico.
 - Kinetic Ising.
 - RNNs.
- Gradiente estándar: $\left\langle \sigma_i \sigma_j \right\rangle_{datos}$
- Propuesta: $\langle \sigma_i(t)\sigma_j(t+\Delta t)\rangle_{datos}$

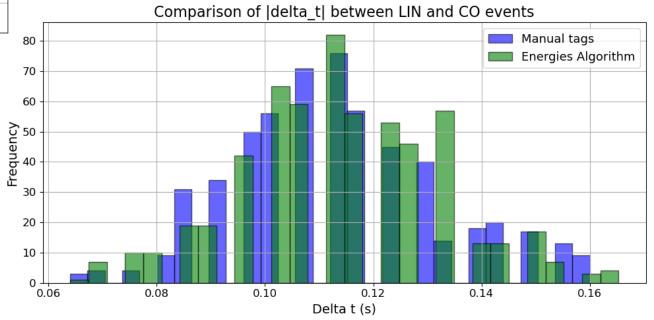
- 3. ¿Cómo validar el resultado final contra el problema supervisado de asignar cada señal a cada fuente?
- Contar con un ground truth validado por un biólogo especializado en E. eileenae.
- Matriz de confusión, precisión, recall.
- Comparación de distribuciones de parámetros acústicos.
 - Distribución de tiempos de los CO y los LIN
 - Distribución de frecuencias de los CO y los LIN
 - Distribución de intensidad de los CO y los LIN
 - Distribución de Δt (tiempo entre CO y LIN)
 - Distribución de Δf (bandas de frecuencias entre CO y LIN)
 - Distribución de Δp (diferencia entre intensidad de los CO y los LIN)

3. ¿Cómo validar el resultado final contra el problema supervisado de asignar cada señal a cada fuente?



3. ¿Cómo validar el resultado final contra el problema supervisado de asignar cada señal a cada fuente?





- 4. ¿Qué se concluye acerca de la hipótesis de co-emisión e inhibición?
- La primera aproximación con un Ising "estático" no puede confirmar ni refutar categóricamente la existencia de reglas dinámicas de co-emisión o inhibición.
- Se observaron acoplamientos positivos persistentes y acoplamientos negativos leves.
- Todavía no hay suficiente evidencia estadística para llegar a conclusiones.
- Al evaluar la aplicación de Ising que se desarrolló para esta tesis, se determinó que el estudio de esta hipótesis queda para trabajos futuros.
- Sin embargo el trabajo hecho en la tesis (preprocesamiento, detección de cantos) constituye un avance significativo en ese sentido.

