

# CUANDO LOS PÁJAROS SUEÑAN: NEUROCIENCIA DEL CANTO

## Reportaje

a Gabriel Mindlin

por Gustavo Viozzi, Cecilia Fourés y Mónica de Torres Curth

Desde la Patagonia, charló con Gabriel Mindlin sobre su trabajo en neuroetología. Nos contó cómo su grupo de trabajo obtiene datos fisiológicos del cerebro y del cuerpo de aves cantoras para analizarlos con modelos matemáticos y físicos y así descubrir las funciones neuronales implicadas en la generación de sonidos complejos.

**Desde La Patagonia (DLP):** Gracias por conversar con nosotros. Para empezar, contanos sobre tu formación y trayectoria, y sobre cómo se constituye tu equipo de trabajo.

**Gabriel Mindlin (GM):** Estudié Licenciatura en Física en la Universidad de La Plata, y cuando egresé me fui a hacer un doctorado en Estados Unidos, a Filadelfia. Hice un doctorado en matemática aplicada, en temas de dinámica no lineal, y después me fui a España, a mi primer trabajo. Volví a Argentina por primera vez (luego volví varias veces) a mediados de los '90. Ahí empecé a trabajar en problemas teóricos de dinámica no lineal y sistemas complejos y de a poco empecé a interesarme por temas relacionados con la biología. Tenía cierto interés por temas de la neurociencia... Después vino la crisis del 2001 y me fui a la Universidad de California en San Diego, donde estuve trabajando un par de años. Ahí se fue cristalizando un programa de investigación y la posibilidad de pedir dinero en Estados Unidos. En 2004 decidí volver a la argentina y con esa financiación monté un laboratorio acá y ahí empezó la historia de este tema específico, ya como una línea principal de investigación.

**DLP:** ¿Te volverías a ir?, pensando en la situación actual de la ciencia en la Argentina.

**GM:** No, viajo con cierta frecuencia a España, tengo alguna colaboración que me permite estar un poquito más afuera, pero ya no estoy como para emigrar, estoy más cerca de jubilarme que de montar un laboratorio de nuevo, pero sí, está complicado el país.

**DLP:** ¿Cómo se llama el laboratorio que montaste? Porque en general el nombre refleja el tema de la investigación...

**GM:** Es interesante esa pregunta, se llama Laboratorio de Sistemas Dinámicos, porque siempre pensé que



Gabriel Mindlin, científico y divulgador de las ciencias, es investigador del CONICET en el Laboratorio de Sistemas Dinámicos del Instituto de Física de Buenos Aires (IFIBA-CONICET) y profesor del Departamento de Física de la Universidad de Buenos Aires. Estudia mecanismos físicos implicados en la generación de sonidos complejos que se encuentran comúnmente en el canto de los pájaros.

el tema del canto de las aves era un caso particular de una problemática más general que a mí me interesaba, que tenía que ver con el estudio de problemas complejos, y como tronco común, el tema de los sistemas complejos y la dinámica no lineal. Nos planteamos: ¿cómo se reconfigura un cerebro durante el proceso de aprendizaje? Es una pregunta de la neurociencia computacional en la que también hay cuestiones de biomecánica, de cuánto de la complejidad de las vocalizaciones tiene que ver con las instrucciones neuronales complejas que le llegan al dispositivo, o de la complejidad de la biomecánica, que le da sus propiedades tímbricas y acústicas particulares. Entonces, todo se conecta por un lenguaje y una pregunta en común: entender los sistemas complejos. Muchos grupos de investigación en el tema de neurociencia, de canto de aves, conocen mi laboratorio, pero por

ahí lo que ignoran es que la problemática que más nos interesa excede al problema en sí del canto de las aves y tiene que ver con la dinámica de sistemas complejos, de emergencia de orden.

**DLP:** Y en el marco general de los problemas complejos, ¿analizan otros problemas, además del canto de las aves?

**GM:** Sí, también investigamos, por ejemplo, cómo funciona la dinámica de las redes neuronales y la inteligencia artificial, distintas arquitecturas de redes neuronales, como los *autoencoders*, las redes recurrentes, por qué es que pueden hacer lo que pueden hacer. Son problemas puramente de dinámica no lineal y que no tienen ninguna vinculación con el tema de aves en sí. Entonces, las líneas del laboratorio, son bien diversas, algunas tienen que ver con aves, por ejemplo, estudiamos el problema de los sueños y cómo interpretar sueños a partir de mediciones fisiológicas, esa es una de las líneas de trabajo. Yo me dedico más a la parte de la biomecánica de la producción vocal. Ana Amador, mi colaboradora en el laboratorio, se fue orientando al problema de la neurociencia del aprendizaje vocal en aves. Ella es física, pero hizo su especialización en temas de neurociencia en Estados Unidos. Cuando volvió a Argentina, se dedicó al problema de la medición de actividad neuronal. En mi grupo tenemos además un becario postdoctoral con el que estoy explorando las líneas de aplicación de inteligencia artificial al reconocimiento de individuos a partir de su voz, o problemas de monitoreo automático de especies, o sea, las aplicaciones de estos temas a la ecología. También hay muchos estudiantes de doctorado, algunos que trabajan en mi línea, que tiene que ver con la biomecánica de producción vocal y la interpretación de sueños. Hay otro chico que trabaja en neuronas electrónicas y en cómo hacer un acople entre un sistema nervioso experimental y neuronas electrónicas, o sea, cómo se integra la bioprostética electrónica dentro de un sistema nervioso. También tenemos otro estudiante que trabaja en la generación de gestos fisiológicos en aves. Ana tiene un estudiante que trabaja en la neurociencia del canto de aves. Este postdoctorando trabaja en las aplicaciones al campo, las aplicaciones de inteligencia artificial a monitoreo

automático de especies, reconocimiento de especies y demás. Y también se está por doctorar un chico que es con quien hicimos estos problemas de neuroetología, es decir, el problema del aprendizaje vocal, pero interactuando con especies en el campo. Ese es un trabajo que nos dio muchas satisfacciones porque hace poquito fue comentado en *National Geographic*. Es muy lindo porque no tiene que ver con trabajo en el laboratorio, sino que se trata de trabajo en el campo. Ahí lo que hicimos fue estudiar si nuestros modelos, estos que habíamos estado desarrollando a lo largo de los años, eran suficientemente creíbles para que un juvenil los tomara como tutor. Y entonces aprovechamos para introducir un canto que estaba extinto desde los años 60 en la naturaleza. Y eso lo hicimos con un estudiante que es un ingeniero que se está por doctorar ahora. En nuestro grupo hay dos estudiantes que son biólogos, el resto son físicos, y este que se está por doctorar es ingeniero. Es una formación muy interdisciplinar la del Laboratorio.

**DLP:** Te queríamos preguntar sobre los obstáculos que hay en el trabajo interdisciplinar, porque las dificultades que se presentan no son solamente una cuestión de lenguaje...

**GM:** Hay problemas que son conceptuales y problemas que son más bien prácticos. El problema conceptual he tratado de dilucidarlo, un poco porque hace años que trabajo con biólogos, la mitad de mis *papers* los publico en revistas de biología y la otra mitad en revistas de física. Estuve 15 años en la asociación del NIH (*National Institute of Health*), tuve que "aprender a hablar" con biólogos, que eran los que me subcontrataban. Es decir, tuve que aprender por el camino más duro a convivir con la interdisciplina *hardcore*. Al principio yo pensaba que el problema era que los físicos no sabemos de biología y que los biólogos no saben matemática. Ciertamente hay problemas de lenguaje, lo cual es, creo, la primera frontera con la que uno se encuentra. Después me di cuenta que esa dificultad es fácilmente resoluble: un biólogo puede aprender matemática o puede aprender, lo que vos necesites que sepa de matemática y un físico puede aprender sobre biología. Lo que es muy difícil de sobrellevar o de entender, es que lo que es riguroso para una disciplina

Imagen extraída de [https://mediospublicos.uy/wp-content/uploads/MINDLIN\\_16x9.png](https://mediospublicos.uy/wp-content/uploads/MINDLIN_16x9.png)



### Física, matemática y biología, disciplinas que se entrelazan para estudiar sueños y cantos.

no es riguroso para la otra. Podríamos decir que un físico sigue las huellas de Newton y que lo que quiere es encontrar los mecanismos minimizados, simplificar los problemas, lo que se considera “ir al hueso”, y piensa que es riguroso cuando va más al hueso y más sintetiza sus reglas. Y el biólogo piensa que “ser riguroso” es enmarcar los problemas en la evolución, porque sigue a Darwin. Entonces, cada vez que simplificás un problema, un biólogo no lo ve como que querés ir al hueso, piensa que vos no entendés la evolución. Cuando vos decís que simplificás, en realidad te estás cargando miles de años de evolución, y entonces un biólogo no considera que sea “serio” lo que estás haciendo, porque vos te estás comportando como un ingeniero que no entiende la biología porque no entiende la evolución. Entonces, el diálogo no es fácil, para un físico, tener en cuenta esos aspectos, a veces, es irse en los detalles. Es muy difícil de entenderse porque los problemas se miran desde paradigmas realmente distintos. Entonces, hasta que no se construye un verdadero respeto, es muy fácil decir que el otro no entiende porque le falta estudiar lo que yo sé. Ese es el problema más grande y es el más complicado de resolver. Hay una manera de hacerlo bien, pero que tiene que partir de un gran respeto de entender cuál es el paradigma desde el que el otro mira las cosas. Una vez que te das cuenta de cuál es el problema, sabés que formar a alguien en una interdisciplina es muy complicado porque, de alguna manera, no es simplemente que hable más o menos una “segunda lengua”. Tiene que realmente entender “la gramática” de la otra disciplina. Entonces, formar a un físico que haga buena biología o un biólogo para que haga una buena dinámica y un buen modelado es difícil. Después está el tema en el que las instituciones no ayudan. Creo que las preguntas no tienen dueño, pero la

plata sí. Algunas disciplinas son muy celosas. “Si tenés una pregunta de biología, ¿dónde estás pidiendo plata? Pedíselo a los otros, ¿por qué se la vamos a dar nosotros?”. Entonces, sobre todo al principio, eso fue bastante difícil. Por ejemplo, no fue sencillo que en el Departamento de Física entendieran que yo tenía un aviario... y eso que yo conseguía mucho más dinero que el resto, porque tenía subsidios internacionales de mucha plata. Sin embargo, había una gran resistencia. Cuando publiqué por primera vez en *Nature*, fue como que se rindieron: “bueno, está bien, debe ser bueno”. Ahí dejaron de poner obstáculos. Pero al principio, cuando era muy joven y empecé con estas cosas, fue muy difícil. Ahora me da un poco de gracia, casi te diría un poco de pena, pero en el momento me molestaba un montón, porque si hay una pregunta que es interesante, que te la resuelva un biólogo o un físico o un ingeniero, a mí me es irrelevante. El asunto es si estás resolviendo bien una pregunta que es interesante. Incluso, me parece que cuando se mira un problema desde muchas perspectivas distintas, se lo termina entendiendo mejor. Después, la comprensión vendrá de recoger todo ese conocimiento que se va generando desde las distintas miradas, y cuanto más amplias sean, más se entenderán los problemas. Participé en todas las comisiones habidas y por haber para dar todas las peleas en todos los frentes de batalla, tuve que participar institucionalmente en las comisiones de doctorado, en cuanta instancia posible para defender este tipo de investigaciones y diversidad de miradas. La resistencia fue menor después de cierta trayectoria, ya no se me discute mucho, al menos a mí, pero es un camino difícil, la verdad es que se te va media vida en esto.

**DLP:** Yendo a la especificidad de algunas de tus líneas de trabajo, contanos qué es la neuroetología.

**GM:** La neuroetología es una disciplina que estudia las bases neuronales del comportamiento. Dentro de este campo el canto de aves es un tema paradigmático, es decir, un comportamiento que es la generación del canto, que tiene una gran importancia para las aves -porque el canto se utiliza para seducir a la pareja, para defender los territorios y para otros fines-. Pero lo que es muy interesante es que en el 40% de las especies este comportamiento -el canto- es aprendido, o sea, no está completamente programado genéticamente. Requiere de una exposición del pichón a un tutor, es decir, una práctica. Para cada problema en particular, en la neuroetología lo que hacemos es ver si existe alguna especie, que es la que se conoce como la “especie campeona”, que es la especie que manifiesta eso que se quiere estudiar en su mayor esplendor. Por ejemplo, para el problema del aprendizaje vocal, están las aves oscinas las cuales son especies que tienen un aparato vocal complejo que les permite

producir cantos elaborados, y poseen la habilidad de aprender y variar sus cantos, es decir, son aves que aprenden. Son del orden de los passeriformes, que comprende aproximadamente la mitad de las especies de aves que existen. Este proceso de aprender y ejecutar el canto está llevado a cabo por un conjunto de núcleos de neuronas cerebrales muy específicos y bien concentrados. Entonces, resulta muy accesible entender cómo se van generando esas instrucciones y cómo se van modificando en el proceso de aprendizaje. El problema del aprendizaje vocal es muy difícil porque no se puede estudiar en cualquier especie, porque es una habilidad muy poco frecuente. Por ejemplo, los monos no realizan un aprendizaje vocal. Los cetáceos, aprenden, los murciélagos, algunos mamíferos como los elefantes, pero es muy raro. Y después no tenés nada más hasta estas aves, las aves oscinas, y también los colibríes y los loros, que no son oscinos. De todo este conjunto de especies, las aves son las que tienen el cerebro más fácilmente “estudiable” para atacar este problema. En estas especies hay un grupo de núcleos neuronales, conocido como “sistema del canto”, donde se generan las instrucciones que finalmente controlan a la respiración y a los músculos vocales. Y hay otro conjunto de núcleos que se encargan de monitorear la práctica y de corregirla hasta llegar a lograr el comportamiento deseado. Es decir, estas aves tienen una “maquinaria cerebral” sencilla, que está muy desglosada, muy modularizada y separadita del resto de las cosas. Por eso es el ideal para entender cómo ocurre este fenómeno del aprendizaje del canto. Es un ejemplo de lo que mencioné, son “especies campeonas”. Tenemos un modelo animal que permite estudiar neurociencia computacional -si te gusta la matemática y simular neuronas-, y además ahí tenemos un modelo para entender y hacer simulaciones donde emerge el comportamiento complejo. ¿Te interesa hacer experimentos? Bien, ¿te interesa estudiar el problema de los sueños? Bien, ahí tenés un caso en el cual sabés en qué lugar del cerebro hay que poner electrodos o, dónde ponerlos en el aparato vocal como para monitorear esa actividad. La neuroetología es eso: es la base neuronal del comportamiento enfocada en cada especie que permite estudiar un problema particular con mucha sencillez. Por ejemplo, la gente a la que le interesa la aparición de ciertos gestos motores estudia los circuitos neuronales del nado en las sanguijuelas. ¿Te interesa el problema del olfato? Bueno, ahí están las abejas y un montón de gente que estudia la neurociencia en las abejas, particularmente para entender el problema del olfato. Para cada problema, para cada comportamiento hay una especie campeona.

**DLP:** Uno se imagina, desde la biología tradicional, que vas a medir los cambios neuronales o el desarrollo cerebral haciendo cortes histológicos después de

determinado experimento. ¿Ustedes cómo lo miden?

**GM:** Hay gente que hizo eso mucho tiempo y que aún lo hace. Por ejemplo, tengo un amigo que estudió el problema de la activación del gen Zenk después de que el ave fue expuesta a un determinado comportamiento. Nosotros lo que hacemos es poner electrodos en estas zonas específicas del cerebro, o en los músculos, o en los sacos aéreos. Hay distintas técnicas para monitorear, y mientras el ave se está comportando, vos medís estas señales fisiológicas. Por ejemplo, Ana pone electrodos en lugares específicos del cerebro, coloca unos pequeños implantes, amplifica la señal, cuando el ave se recupera empieza a cantar y a comportarse como antes y lo que se va viendo es la actividad neuronal en zonas específicas del cerebro. Ella estudia, por ejemplo, el núcleo HVC, que es uno de los núcleos del sistema del canto en el que se originan en parte estas instrucciones, y está tratando de dilucidar qué nivel de información ya está codificado a esa altura, y cómo se va enriqueciendo esa señal a medida que se acerca al sistema periférico. Yo, por ejemplo, mido la actividad de distintos músculos en la siringe -el órgano fonador de las aves-, o en el sistema respiratorio, mientras el ave está ejecutando su canto.

**DLP:** ¿Eso se mide por medio de impulsos eléctricos?

**GM:** Tal cual. Por ejemplo, lo que Ana hace con los electrodos es eso, ella mide las variaciones de voltaje con electrodos de alta impedancia, extracelulares, entonces registra las variaciones de potencial que ocurren en el entorno de alguna neurona particular, o se utiliza menos impedancia en un conjunto de neuronas, y mientras el ave está cantando, esa neurona, o conjunto de neuronas, va cambiando su nivel de actividad y se miden las fluctuaciones de potencial.

**DLP:** Suena complicadísimo... Implantar esos electrodos debe ser un trabajo muy fino.

**GM:** Si, muy fino. Tenemos que hacer nosotros los electrodos, y la amplificación y el problema del ruido, es súper complejo. Lo mismo que cuando se mide información fisiológica en músculos, es muy delicado hacer las cirugías, hay que implantar estos electrodos, recomponer todo, hacerlo tan rápido y tan indoloro, que no solamente cumplas con los requisitos de ética, sino que, además, el ave tenga ganas de empezar a cantar de nuevo. O sea, tienen que ser operaciones indoloras, rápidas, eficientes, y la información tiene que ser amplificada, porque las fluctuaciones de voltaje que registramos son tan mínimas que si no se hace una pre-amplificación y un tratamiento de la señal, lo que se observa es ruido de línea de 50 Hz. Tenemos enormes problemas y desafíos electrónicos para medir esos voltajes tan pequeñitos y poder sacar información y que el ave continúe con su comportamiento habitual.

**DLP:** A estos animales experimentales ¿los tienen en un aviario, o están afuera, en el campo?

**GM:** Los experimentos que les comento, tanto en músculo como en cerebro, son en el aviario. Los trabajos que hacemos en el campo no son invasivos y son comportamentales. Por ejemplo, ponemos cajas acústicas donde tenemos cantos sintéticos y estudiamos la respuesta de los animales a esos estímulos. Esos experimentos son mucho menos invasivos, y apuntan a entender cómo responden los animales a ciertos estímulos que diseñamos, modelamos y sintetizamos. Por ejemplo si queremos ver si un canto es “sexy” o si un canto es intimidante, sintetizamos un canto con ciertas características y observamos comportamentalmente cómo responde el animal.

**DLP:** ¿Han tenido que reducir o modificar los experimentos por cuestiones del comité de ética?

**GM:** Cuando yo empecé en Exactas, había pocas regulaciones en cuanto a algunas cuestiones de ética. Los comités de ética empezaron hace, aproximadamente 25 años. Nosotros tuvimos una persona: Adela Rosenkrantz, que había trabajado muchos años en Brasil. Cuando se jubiló vino a Argentina y nos ayudó a armar todo el circuito: la circulación de los comités de ética y el funcionamiento de estos comités. En ese momento yo tenía subsidios de bastante dinero del NIH y contraté una veterinaria para que nos ayudara a hacer modelos de protocolos y otras cosas necesarias. Puse mucho trabajo y mucha participación y después mucha plata para poner en marcha el tema de los comités de ética. Son mecanismos muy complejos, tienen colegas de distintas disciplinas, tiene público general, tiene estadísticos y demás. En Exactas se trata de satisfacer los mismos requerimientos que tendrías que satisfacer si estuvieras en Estados Unidos o en Europa. O sea, la legislación unida de las restricciones es la que nos rige a nosotros. Y esa legislación está permanentemente pidiendo, lo que llaman “las tres R”, que es exigencia sobre reemplazar un experimento si realmente no hace falta, reducir las muestras, si son reducibles – es decir, cuál es el mínimo número de muestras con las que se puede hacer eso-, y, si se puede reemplazarlo por algún otro tipo de cálculo o trabajo teórico. Hay una serie de cuestiones donde en forma progresiva e insistente se ponen limitaciones a los experimentos que se hacen, y me parece que está muy bien. Entonces cada vez hay que tener preguntas que son más pertinentes, hacerlas con la menor cantidad de animales y hacer solamente los experimentos que sean realmente imprescindibles. Para mí, eso no solo mejora la ética, también te obliga a agudizar el ingenio, ya no te permiten lo que en física teórica sería una *Fishing Expedition*, tirar simulaciones, cambiar parámetros... si hay una vida en juego, no se hace. Entonces hay que decir explícitamente qué es lo que

vas a hacer, cuántos animales se estima que se van a utilizar, qué se haría en caso de tener algún problema, si habrá alguna muestra de dolor: cómo se va manejar, cómo se ha a actuar si hay un accidente en el trabajo, o sea, es una pesadilla en ese sentido, en el mejor de los sentidos. Hay que escribir protocolos extremadamente largos y después son ampliamente criticados, o sea, realmente aprobar uno de estos protocolos lleva mucho más tiempo que un *paper*, y a veces me exaspera, pero cuando uno lo piensa, está bien que sea así. Hay un conjunto de protocolos que ya tengo aprobados sobre cómo hacemos neurociencia, cómo hacemos fisiología, entonces solo tengo que hacer pequeñas variaciones sobre grandes protocolos ya hechos. Ahora tenemos que hacer anillados de aves porque estamos haciendo un trabajo en el campo, esa es una línea completamente nueva y para algo tan sencillo como anillar una especie, hay que explicar, justificar, decir qué pasaría si tuvieras un problema en la red, si se lastima un animal, en fin, ahora tiene que pasar por un exhaustivo examen por parte de tus pares, cosas que antes eran impensables, vos ibas anillabas y a nadie le importaba.

**DLP:** Pensando que estamos frente a una revista de divulgación, si tuvieras que pensar algún hallazgo del que pudieras decir “esto me voló la cabeza como investigador”, ¿cuál compartirías?

**GM:** Una de las experiencias más fuertes para mí fue cuando pude escuchar con qué soñaba un pájaro, eso fue definitivamente un momento muy significativo en mi carrera. Un colega nuestro, Dan Margolis, en Chicago, sabía que de noche, cuando las aves duermen, en las áreas del cerebro donde se generan las instrucciones, había ciertos niveles de actividad de tanto en tanto, que a veces eran muy parecidas a las que se ve cuando el ave ejecuta el comportamiento. Pero también aparecían otras cosas, y como no existe el código completo que te dice si yo tengo tal cantidad de disparos, tengo tal canto, cuando había cosas que no eran idénticas a lo que se medía durante el día, no sabíamos qué significaba. Encontramos, y fue un hallazgo inesperado, que toda esta información bajaba a los músculos que controlan el aparato vocal, es decir a la siringe, no a la parte respiratoria, o sea, el ave sigue respirando normalmente, silenciosamente, pero en la parte de los músculos siríngeos aparecían estos patrones, y entonces, como teníamos unos modelos matemáticos que permiten traducir esa actividad en canto, lo que pudimos hacer es, cada vez que aparecían estos episodios, sintetizar el sonido correspondiente. Así, el ave está dormida, y empezamos a escuchar cómo canta y con qué canta, y fue una caja de Pandora, porque nos encontramos con especies que durante el día cantan cosas muy estereotipadas, y de noche empiezan a tener sueños con cantos un poco



Imagen: Gentileza de Axel de Torres Curth (@axelcurth)

**El chingolo (*Zonotrichia capensis*) aprende su canto por imitación y desarrolla dialectos regionales, lo que lo convierte en un modelo clave para estudiar el aprendizaje vocal.**

más locos. Uno se puede pasar toda otra carrera estudiando la gramática de los sueños y hacer un estudio cuantitativo de los sueños, que es un tema fascinante, para mí fue uno de los grandes temas. También hubo un trabajo que me dio muchísima alegría publicado por *National Geographic*. Estábamos estudiando las distintas melodías que cantaban unos chingolos en el Parque Pereyra, un tema que empezamos en la pandemia, y usamos técnicas de inteligencia artificial para ver cuáles eran consistentes con unas viejas notas que había tomado un ornitólogo en el campo, en la misma zona por los años '60. Vimos que algunos cantos se preservaban y que otros no. Entonces, se me ocurrió ver si podíamos sintetizar un canto de los que ya no se escuchaban, "ponerlo de moda" a través de unos robots acústicos y ver si algún pájaro lo copiaba. Y bueno, el día que vimos a un juvenil que había tomado la posta y había aprendido ese canto, me dio muchísima alegría y después lo seguí y lo encontré enseñándose-lo a otros juveniles. Entonces esta reaparición de un canto que estaba extinto también fue de esos temas que a mí me hicieron reír un montón. La posibilidad de recuperar una cultura vocal me había encantado.

**DLP:** ¿Podría haber consecuencias no deseadas en el hecho de reintroducir un canto?

**GM:** Primero hay que decir que suena más espectacular de lo que en realidad es, porque en un canto lo que nosotros ponemos es una sílaba pequeñita en el medio de unas sílabas existentes, entonces es una perturbación mínima en el canto. Por otro lado, lo que

también es cierto es que en esa zona donde se había registrado el canto extinto, había una cantidad de animales que no es la misma que ahora, porque es una zona que ha sido totalmente tomada por quinteros. Está muy modificada, muy impactada. Los cantos que eran cantados por muy poquitos individuos, al disminuir la cantidad de individuos, desaparecieron, pero no es porque hubiera algo malo en el canto. Por otro lado, sabemos que en otras zonas ese canto se sigue cantando. Entonces nosotros lo que estimamos es que era una puntuación muy pequeña de un canto que ya existía en la zona y que si no se encuentra es porque era muy poco cantado y al haber muchos menos individuos, ¿ese canto va a perdurar?, probablemente no... lo más seguro es que vuelva a desaparecer.

**DLP:** Contanos sobre los regionalismos en los cantos en los chingolos.

**GM:** Lo que se sabe es que el canto de un chingolo tiene unas sílabas introductorias y un trino. El trino es algo que cambia mucho en grandes regiones geográficas. En la macrogeografía hay dialectos, que probablemente tengan mucho que ver con las propiedades de la vegetación de la zona. Es decir, si hay un bosque muy denso donde puede haber un montón de rebotes, si el canto que realiza un chingolo es demasiado rápido, se pierde la identidad del trino. Entonces, en esas zonas en general son más lentos, y en las zonas más abiertas son más rápidos. Dentro de una zona, de un dialecto, lo que encontramos son microtemas, y estas variaciones, como la que yo introduje, son en el tema.

Es una variación dentro del tema. No afecta a la parte dialectal. Si se pusiera algo dialectalmente distinto, ahí habría una afectación del comportamiento severa, porque ante la presencia de alguien que es un invasor, la respuesta es mucho más exacerbada, es más violenta, es muy disruptivo. Si se trae a un individuo de otra zona y canta, es más disruptivo. En general, los animales son más pacientes con quienes tienen el dialecto de la zona. Además, los chingolos son muy territoriales y no migran.

**DLP:** ¿Hay variaciones entre un individuo al otro, además de las locales?

**GM:** Si, en general, dentro de una zona de unos pocos kilómetros cuadrados, habrá unos diez temas distintos, y dentro de cada tema, cada animal da pequeñas variaciones en el rango de frecuencias que cantan. Por ejemplo, todos hacen dos sílabas crecientes y una decreciente, que sería un estándar en esta zona, luego cada individuo tiene un rango de frecuencias ligeramente distinto, entonces se puede distinguir cada individuo particular, aunque canten realmente muy parecido. Además, cada uno tiene su gesto, o sea, cuando se miran en detalle las frecuencias, cada individuo tiene un gesto que es ligeramente distinto.

**DLP:** ¿Y machos y hembras cantan igual?

**GM:** Eso depende de cada especie. En general no, en general cantan los machos. Hay algunas especies donde cantan los machos y las hembras. En el hornero, por ejemplo, duetean y cantan los dos, y son bien distinguibles cuál es cuál.

**DLP:** Mencionaste que usaban inteligencia artificial y unos robots para introducir estas frases o estas sílabas en los cantos de los pájaros. ¿Podés contarnos cómo es el uso de la inteligencia artificial?

**GM:** Desarrollamos redes neuronales que se llaman redes siamesas, que son dos redes convolucionales que trabajan en paralelo, cuya última capa es un espacio abstracto. Hay que entrenar este par de redes para que, si se le ponen cosas que preclasificas como distintas, las mapee en lugares muy separados de ese espacio abstracto, y si son cosas que se consideran de la misma clase, las mapee muy cerquita. Entonces se define una métrica, y ahí sí se puede responder lo que me preguntabas... O sea, si tenemos dos animalitos distintos, una vez que se entrenó una red para que te dé una métrica de qué es parecido y qué es distinto, puedes diferenciar cantos, aunque parezcan similares a simple oído. Es necesario tener una medida objetiva de si dos pájaros están cantando lo mismo. Entonces se genera una red neuronal que ayuda en la tarea de identificar si dos cantos son iguales o no. Se define esa métrica y bueno, con esa métrica nosotros,

por ejemplo, pudimos distinguir si los cantos de ahora eran los mismos que los de los años '60. Eso fue una aplicación de redes neuronales e inteligencia artificial al problema. Y después utilizamos herramientas más tradicionales de la física, como la síntesis de modelos matemáticos biomecánicos, para generar estos cantos que metíamos en los robots acústicos. Entonces, desde ahí se generan cantos sintéticos en los que se empiezan a modificar los parámetros para que el robot cante ligeramente distinto, pero hay un control de qué es lo que se está cambiando, que es la física más tradicional, interpretativa, y la ciencia menos interpretativa de las redes neuronales, donde se entrena un sistema y no se sabe lo que está pasando. Entonces usamos las dos herramientas en este proyecto.

**DLP:** ¿Qué le dirías a chicos que están terminando el secundario si te preguntan por qué es importante estudiar el canto de las aves?

**GM:** Lo que les diría es que lo importante es estudiar. Eso es lo importante. Lo importante es estudiar porque eso da herramientas y da libertad para después trabajar y analizar lo que tengas ganas, o lo que les interese o lo que consideren importante. Yo no sé si convencería a nadie sobre que es importante estudiar el canto de las aves. A mí me resultó importante porque me interesaba abordar el problema de aprendizaje. Entonces, dentro de ese campo, mi experiencia es que estas herramientas de tipo física o matemática dan un enorme poder para estudiar una gran variedad de problemas. Entonces, ¿te interesa el tránsito, te interesa la biología, te interesa la tecnología, te interesa la inteligencia artificial? Bueno, estudiar estas disciplinas da mucha libertad. Es un montón de esfuerzo durante ciertos años, que te autodisciplina un montón, pero después quedás muy libre de estudiar lo que realmente te interese. A mí me encantó estudiar el canto de las aves y el aprendizaje.

**DLP:** Te agradecemos tu tiempo, tu buena disposición y cerrá la entrevista como quieras.

**GM:** A los jóvenes les digo: que hay muchos estímulos y llamados para que no estudien. Que no lo sigan, o sea, que realmente se comprometan con estos esfuerzos, aunque no parecen tan acordes a los tiempos actuales, porque estamos acostumbrados a lo inmediato, a la poca concentración, etc. Entonces, por más que parezca un plomo, no hay atajos. Los tipos de trabajos que van a hacer, cuando uno estudia, son mucho más lindos que los que uno termina haciendo si no estudiamos. Entonces, si tienen la oportunidad de estudiar, que la aprovechen. Eso es lo que les diría.