SRAS Final Report

Caracterización acústica del llamado de alarma del cocodrilo de pantano (*Crocodylus moreletii*) en ambientes acústicamente contrastantes del sureste de México

Sofía Karen Pérez Cruz
Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México
(sofia.perez@st.ib.unam.mx com)

Resumen

Los crocodilianos presentan uno de los sistemas de comunicación acústica más desarrollados dentro de los reptiles; sin embargo, los factores que determinan la variación de sus vocalizaciones permanecen poco estudiados, especialmente en especies neotropicales. El presente trabajo tuvo como objetivo caracterizar acústicamente el llamado de alarma del cocodrilo de pantano (*Crocodylus moreletii*) y evaluar si su estructura varía entre categorías de edad y entre poblaciones que habitan ambientes acústicamente contrastantes. Hasta la fecha se han realizado muestreos en dos localidades del sureste de México, donde se registraron los niveles de ruido ambiental y se obtuvieron grabaciones del llamado de alarma de neonatos, crías y juveniles. Las vocalizaciones fueron analizadas mediante software especializado para cuantificar parámetros temporales y espectrales, los cuales posteriormente fueron comparados entre localidades y categorías de edad mediante análisis estadísticos. Los resultados preliminares muestran diferencias en la estructura del llamado de alarma entre categorías de edad, así como variación en algunos parámetros acústicos entre localidades con diferentes condiciones de ruido ambiental. Asimismo, el tamaño corporal explicó parte de la variación observada en diversos atributos acústicos. Estos avances representan una de las primeras caracterizaciones bioacústicas del llamado de alarma de *Crocodylus moreletii* en México y proporcionan información novedosa sobre la posible influencia del ambiente acústico en la comunicación de esta especie. Los análisis finales permitirán fortalecer la interpretación ecológica de los resultados y contribuirán al conocimiento de la evolución de la comunicación acústica en crocodilianos.

Abstract

Crocodilians possess one of the most highly developed acoustic communication systems among reptiles; however, the factors that determine the variation in their vocalizations remain understudied, especially in Neotropical species. The objective of this study was to acoustically characterize the alarm call of the Morelet's crocodile (*Crocodylus moreletii*) and to evaluate whether its structure varies across age categories and among populations inhabiting acoustically contrasting environments. To date, sampling has been conducted at two sites in southeastern Mexico, where ambient noise levels were recorded and recordings of the alarm call from newborns, hatchlings, and juveniles were obtained. The vocalizations were analyzed using specialized software to quantify temporal and spectral parameters, which were subsequently compared across sites and age categories through statistical analysis. Preliminary results show differences in the structure of the alarm call across age categories, as well as variation in some acoustic parameters between locations with different environmental noise conditions. Furthermore, body size accounted for part of the variation observed in various acoustic attributes. These findings represent one of the first bioacoustic characterizations of the alarm call of *Crocodylus moreletii* in Mexico and provide new insights into the possible influence of the acoustic environment on communication in this species. Final analyses will strengthen the ecological interpretation of the results and contribute to our understanding of the evolution of acoustic communication in crocodilians.

Introducción

La comunicación constituye uno de los procesos fundamentales mediante los cuales los organismos intercambian información relacionada con la reproducción, la defensa del territorio, el reconocimiento individual y el cuidado parental (Bradbury y Vehrencamp, 2011). Entre los diferentes tipos de señales utilizadas por los vertebrados, las señales acústicas destacan por su capacidad para transmitirse eficientemente a largas distancias y en ambientes con visibilidad limitada (Kumar, 2003). Como consecuencia, la comunicación acústica desempeña un papel central en la ecología conductual de numerosos grupos animales.

Aunque históricamente los reptiles fueron considerados organismos relativamente silenciosos, investigaciones desarrolladas durante las últimas décadas han demostrado que los crocodilianos poseen uno de los repertorios vocales más complejos dentro de este grupo, utilizando diferentes tipos de vocalizaciones asociadas con el cortejo, la defensa territorial, el mantenimiento del contacto social y el cuidado parental (Lang, 1987; Vergne et al., 2007, 2009). Entre estas señales, el llamado de alarma emitido por neonatos y crías representa uno de los componentes más importantes del sistema de comunicación, ya que desencadena respuestas inmediatas de protección por parte de los adultos y aumenta la probabilidad de supervivencia de los individuos jóvenes (Romero, 1983). Estudios recientes han demostrado que la estructura acústica de estos llamados contiene información sobre el tamaño corporal del emisor, permitiendo a los adultos discriminar entre individuos de diferentes edades y responder diferencialmente a las vocalizaciones (Chabert et al., 2015). Sin embargo, además de los factores morfológicos, las condiciones ambientales también pueden influir sobre las propiedades acústicas de las señales.

En los últimos años, el incremento del ruido generado por actividades humanas ha sido reconocido como una nueva presión ambiental capaz de modificar los sistemas de comunicación de numerosas especies (Slabbekoorn y Peet, 2003; Luther y Derryberry, 2012). En aves, anfibios y algunos reptiles se ha documentado que las vocalizaciones pueden modificar su frecuencia, duración o intensidad en respuesta a ambientes ruidosos, reduciendo potencialmente la eficiencia de la comunicación (Brumm y Zollinger, 2017). No obstante, estos procesos permanecen prácticamente inexplorados en crocodilianos, especialmente en especies distribuidas en ambientes tropicales.

En México, donde *Crocodylus moreletii* constituye uno de los principales depredadores de los humedales tropicales, aún se desconoce si la creciente perturbación acústica modifica las señales utilizadas durante las primeras etapas del desarrollo. El cocodrilo de pantano (*Crocodylus moreletii*) constituye una excelente especie para investigar estos procesos debido a su amplia distribución en el sureste de México y a que muchas de sus poblaciones habitan ambientes con distintos grados de perturbación humana. Comprender cómo varía la estructura del llamado de alarma en función del desarrollo y del ambiente acústico permitirá generar información básica para entender la evolución de la comunicación acústica en crocodilianos y evaluar el posible impacto del ruido antropogénico sobre su comportamiento. Por ello, el objetivo de este estudio fue caracterizar acústicamente el llamado de alarma de *C. moreletii* y evaluar la variación de sus atributos acústicos entre categorías de edad y entre poblaciones que habitan ambientes acústicamente contrastantes del sureste de México. Los resultados obtenidos constituyen un avance importante hacia el conocimiento de la bioacústica de esta especie y proporcionan una base sólida para futuras investigaciones orientadas a la ecología acústica y la conservación de crocodilianos.

Materiales y Metodos

El estudio se desarrolló utilizando poblaciones de cocodrilo de pantano (*Crocodylus moreletii*) procedentes de dos localidades del sureste de México con condiciones acústicas contrastantes: la Unidad de Manejo para la Conservación de la Vida Silvestre (UMA) de la División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (Villahermosa, Tabasco) y la UMA Nicté-Há (Campeche) (Figura 1). La primera se caracteriza por estar inmersa en un ambiente urbano con una

importante influencia de ruido antropogénico generado por el tránsito vehicular, actividades académicas y tráfico aéreo, mientras que la segunda presenta un ambiente con menor perturbación acústica y condiciones más cercanas a un hábitat natural. Estas características permitieron evaluar la posible influencia del paisaje sonoro sobre la estructura del llamado de alarma.

Los muestreos se realizaron durante la temporada reproductiva y de eclosión de la especie, periodo en el que las vocalizaciones de las crías son más frecuentes y cumplen una función importante en el establecimiento del cuidado parental (Lang, 1987; Vergne et al., 2009). En total se registraron 64 individuos, incluyendo 10 neonatos, 47 crías y siete juveniles. Cada ejemplar fue manipulado siguiendo protocolos estandarizados para minimizar el estrés durante el manejo y garantizar la obtención de grabaciones de alta calidad. Simultáneamente se obtuvieron medidas morfométricas, incluyendo longitud total, longitud hocico-cloaca, diferentes medidas craneales, perímetro basal de la cola y peso corporal, con el propósito de evaluar la influencia del tamaño corporal sobre las características acústicas del llamado.

Las vocalizaciones fueron registradas utilizando un micrófono direccional conectado a una grabadora digital, almacenándose en formato WAV sin compresión para preservar la calidad de la señal. Cada individuo fue grabado de forma independiente bajo condiciones controladas, procurando estandarizar las condiciones de grabación y minimizar la interferencia de sonidos ambientales. Paralelamente se cuantificó el ruido ambiental de cada localidad mediante un decibelímetro digital, obteniéndose mediciones durante diferentes periodos del día y de la noche con el fin de caracterizar el ambiente acústico de cada sitio de estudio.

El procesamiento de las grabaciones se realizó mediante el software Raven Pro 1.5 (Cornell Lab of Ornithology), donde se generaron espectrogramas y se seleccionaron únicamente aquellas vocalizaciones con una adecuada relación señal-ruido. Para cada llamado se cuantificaron diferentes parámetros temporales y espectrales, incluyendo variables relacionadas con la duración, frecuencia mínima, frecuencia máxima, frecuencia pico y distribución de la energía acústica, las cuales fueron utilizadas para describir la estructura del llamado de alarma.

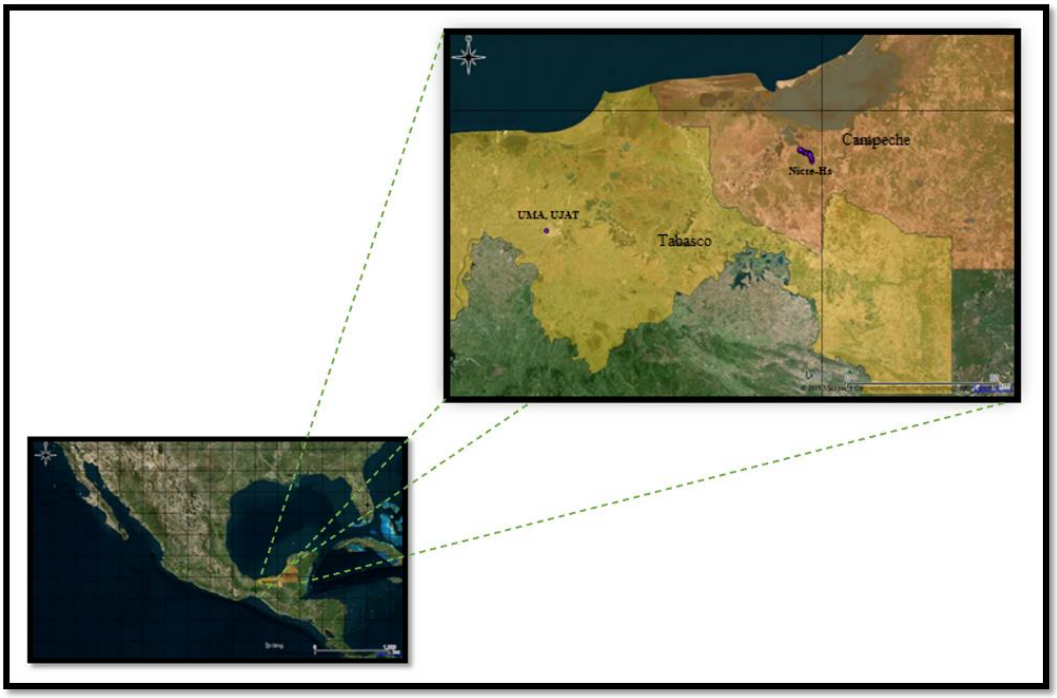


Figura 1. Localización de los sitios de estudios en el sureste mexicano: la Unidad de Manejo para la Conservación de la Vida Silvestre (UMA) de la División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (Villahermosa, Tabasco) y la UMA Nicté-Há (Campeche).

Posteriormente, los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software R (R Core Team, 2020). En una primera etapa se compararon los niveles de ruido ambiental entre localidades. Posteriormente se evaluaron diferencias en las características acústicas entre categorías de edad y entre localidades mediante pruebas estadísticas apropiadas para cada variable. Finalmente, los atributos acústicos que mostraron diferencias significativas fueron incorporados en modelos que incluyeron la localidad y la relación longitud total/peso como variables explicativas, con el propósito de explorar la influencia conjunta del ambiente acústico y del tamaño corporal sobre la estructura del llamado de alarma.

Resultados

Como resultado de las actividades desarrolladas durante el proyecto se obtuvo una base de datos bioacústica y morfométrica de *Crocodylus moreletii* procedente de dos localidades del sureste de México con diferentes condiciones ambientales. En total se analizaron los llamados de alarma de 64 individuos distribuidos en tres categorías de edad (neonatos, crías y juveniles), lo que permitió realizar una caracterización preliminar de la variación acústica asociada al desarrollo ontogénico y al ambiente donde habitan los organismos.

La caracterización del paisaje sonoro mostró diferencias claras entre las dos localidades estudiadas (Figura 2). Las mediciones de ruido ambiental registradas durante el día y la noche indicaron que la UMA de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco presentó niveles de ruido superiores a los registrados en la UMA Nicté-Há. Además de los mayores niveles de presión sonora, la localidad de Tabasco mostró una mayor presencia de fuentes de ruido asociadas con actividades humanas, incluyendo tránsito vehicular, tráfico aéreo y actividades académicas, mientras que en Nicté-Há predominó un ambiente acústico más homogéneo y con menor influencia antropogénica. La diferencia observada entre ambas localidades confirmó la existencia de ambientes acústicos contrastantes, condición indispensable para evaluar la hipótesis planteada en este estudio.

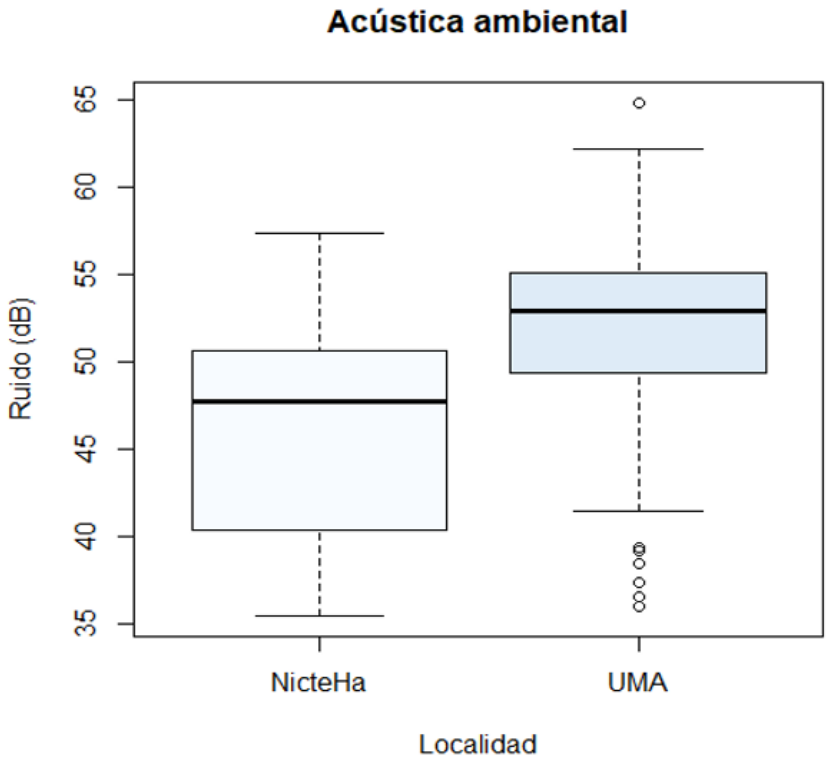


Figura 2. Comparación de ambiente acústico del día entero entre localidades.

El análisis de las vocalizaciones permitió identificar diferencias en la estructura acústica del llamado de alarma entre las distintas categorías de edad (Tabla 1). Los resultados preliminares muestran que diversos parámetros temporales y espectrales variaron conforme aumentó el tamaño corporal de los individuos, lo que coincide con la hipótesis de que las características físicas del aparato fonador y el desarrollo corporal influyen directamente en la producción de las vocalizaciones. En términos generales, los llamados emitidos por neonatos presentaron frecuencias más elevadas que los registrados en crías y juveniles, mientras que algunos parámetros relacionados con la duración y distribución de la energía acústica también mostraron cambios asociados con el crecimiento.

Tabla 1. Comparación acústica del llamado de alarma entre las categorías de edad (neonato, cría, juvenil).

Variable	*Prueba Estadística*	*Valor de P*	*Ho vs. Ha*
Delta Time	Kruskal-Wallis	0.9957	Ho
Low Frequency	Kruskal-Wallis	**0.04653**	**Ha**
Peak Frequency	Kruskal-Wallis	0.8656	Ho
High Frequency	Kruskal-Wallis	0.5838	Ho
Delta Frequency	Kruskal-Wallis	**0.4544**	**Ha**
Q1 Frequency	Kruskal-Wallis	0.6231	Ho
Q3 Frequency	Kruskal-Wallis	0.8093	Ho
IQR BW	Kruskal-Wallis	0.9351	Ho
Frequency 5%	Kruskal-Wallis	0.1209	Ho
Average entropy	ANOVA	0.615	Ho
Arm	Kruskal-Wallis	0.4708	Ho

La comparación entre localidades reveló que las crías provenientes de ambientes acústicamente contrastantes presentaron diferencias significativas en algunos atributos del llamado de alarma (Tabla 2). Aunque estas diferencias fueron menos marcadas que las observadas entre categorías de edad, sugieren que el ambiente acústico podría influir sobre la variación de las vocalizaciones. Estos resultados son consistentes con investigaciones realizadas en otros grupos de vertebrados, donde el ruido ambiental modifica diferentes propiedades de las señales acústicas para favorecer su transmisión o detección en ambientes ruidosos (Slabbekoorn y Peet, 2003; Luther y Derryberry, 2012).

Con el propósito de explorar los factores que explican esta variación, se desarrollaron modelos estadísticos incorporando la localidad y la relación longitud total/peso como variables explicativas. Los análisis realizados hasta el momento indican que el tamaño corporal explica una parte importante de la variación observada en algunos parámetros acústicos, mientras que otros atributos parecen responder de manera más compleja a la interacción entre factores morfológicos y ambientales.

En conjunto, estos resultados representan uno de los primeros conjuntos de datos bioacústicos obtenidos para *Crocodylus moreletii* en México bajo condiciones tanto de cautiverio como de ambientes con diferente grado de perturbación acústica. La información generada constituye una base sólida para continuar con los análisis estadísticos, profundizar en la interpretación biológica de las diferencias observadas y evaluar con mayor precisión el posible efecto del ruido antropogénico sobre la comunicación acústica de esta especie.

Tabla 2. Resultados de la comparativa estadística de las variables acústicas de los llamados de alarma de las crías entre sitios.

Variable Acústica	**Prueba**	*Valor de "p"*	*p>0.05 (Ho); p< 0.05 (Ha)*
Delta Time (s)	U de Mann Whitney	p-value = 0.4372	p>0.05 (Ho) iguales
Low Frecuency (Hz)	U de Mann Whitney	p-value = 0.04899	p<0.05 (Ha) **diferentes**
Peak Frecuancy (Hz)	U de Mann Whitney	p-value = 0.0001454	p<0.05 (Ha) **diferentes**
High Frequency (Hz)	U de Mann Whitney	p-value = 0.9912	p>0.05 (Ho) iguales
Delta Frequency (Hz)	U de Mann Whitney	p-value = 0.06561	p>0.05 (Ho) iguales
Q1 Freq. (Hz)	U de Mann Whitney	p-value = 0.0001956	p<0.05 (Ha) **diferentes**
Q3 Freq. (Hz)	U de Mann Whitney	p-value = 0.0001169	p<0.05 (Ha) **diferentes**
IQR BW (Hz)	U de Mann Whitney	p-value =6.017e-05	p<0.05 (Ha) **diferentes**
Freq. 5% (Hz)	U de Mann Whitney	p-value = 0.00756	p<0.05 (Ha) **diferentes**
Avg. entropy (Bit)	Student	p-value = 8.422e-05	p<0.05 (Ha) **diferentes**
Arm.	U de Mann Whitney	p-value = 0.02419	p<0.05 (Ha) **diferentes**

Conclusiones y hallazgos relevantes

El presente proyecto ha permitido generar la primera caracterización detallada del llamado de alarma de *Crocodylus moreletii* en poblaciones del sureste de México sometidas a diferentes condiciones acústicas. La información obtenida constituye uno de los conjuntos de datos bioacústicos más completos disponibles para esta especie y representa una contribución importante al conocimiento de la comunicación acústica en crocodilianos.

Los resultados preliminares confirman que la estructura del llamado de alarma varía entre categorías de edad, lo que respalda la hipótesis de que el tamaño corporal constituye uno de los principales factores que determinan las características acústicas de esta vocalización. Estos resultados son congruentes con estudios realizados en otras especies de crocodilianos, donde la información contenida en las vocalizaciones permite a los adultos reconocer el tamaño y el estado de desarrollo de las crías (Chabert et al., 2015).

Asimismo, las diferencias observadas entre localidades sugieren que las condiciones acústicas del hábitat podrían influir sobre algunos atributos del llamado de alarma. Aunque estos resultados deberán fortalecerse mediante análisis adicionales, representan una de las primeras evidencias disponibles para *C. moreletii* que relacionan la variación acústica con el ambiente sonoro. Este aspecto adquiere especial relevancia debido al incremento de la contaminación acústica en humedales tropicales y al creciente interés por comprender sus efectos sobre la fauna silvestre (Slabbekoorn y Peet, 2003; Luther y Derryberry, 2012).

Los análisis derivados de este proyecto continúan en desarrollo y serán incorporados en la versión final de la tesis de maestría. Asimismo, se prevé que los resultados obtenidos den origen a publicaciones científicas arbitradas y presentaciones en congresos especializados, ampliando el impacto del apoyo otorgado por el Student Research Assistance Scheme (SRAS) del Crocodile Specialist Group**.**

En conjunto, los avances alcanzados gracias al financiamiento recibido fortalecen el conocimiento sobre la biología de *Crocodylus moreletii* y aportan información novedosa para comprender la evolución de la comunicación acústica en crocodilianos. A largo plazo, esta información podrá contribuir al diseño de estrategias de monitoreo no invasivo y al desarrollo de programas de conservación que consideren la importancia del paisaje sonoro como componente del hábitat de las poblaciones naturales.

Agradecimientos

Agradezco al Crocodile Specialist Group (CSG**)** de la Species Survival Commission (SSC) de la International Union for Conservation of Nature (IUCN) por el apoyo financiero otorgado mediante el programa Student Research Assistance Scheme (SRAS)**,** el cual hizo posible el desarrollo de una parte importante del trabajo de campo y del análisis de la información presentada en este informe. Se agradece igualmente al proyecto FORDECyT No. 273646 "Cambio global y sustentabilidad en la cuenca del Usumacinta y zona marina de influencia: bases para la adaptación al cambio climático desde la ciencia y la gestión del territorio", por el apoyo logístico y financiero brindado durante las actividades de campo. Asimismo, se agradece a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, a la UMA Nicté-Há y a todas las personas e instituciones que facilitaron el acceso a las áreas de estudio y colaboraron durante el trabajo de campo.

Literature Cited

Bradbury, J.W. & Vehrencamp, S.L. (2011). *Principles of Animal Communication*. 2nd Edition. Sinauer Associates, Sunderland, Massachusetts.

Brumm, H. & Zollinger, S.A. (2017). Vocal plasticity in a reptile. *Proceedings of the Royal Society B* 284: 20170451.

Chabert, T., Colin, A., Aubin, T., Shafiei Bafti, S., Lilin, T. & Mathevon, N. (2015). Size does matter: crocodile hatchlings are able to encode body size information in distress calls. *Animal Cognition* 18: 265–273.

Kumar, A. (2003). Acoustic communication in animals. *Resonance* 8: 44–55.

Lang, J.W. (1987). Crocodilian behaviour: implications for management. In: Webb, G.J.W., Manolis, S.C. & Whitehead, P.J. (Eds.), *Wildlife Management: Crocodiles and Alligators*, pp. 273–294. Surrey Beatty & Sons, Sydney.

Luther, D.A. & Derryberry, E.P. (2012). Birdsongs keep pace with city life: changes in song over time in an urban songbird affects communication. *Proceedings of the Royal Society B* 279: 4828–4835.

R Core Team. (2020). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Romero, L.M. (1983). Distress call saves a *Caiman crocodilus* hatchling on the Venezuelan Llanos. *Biotropica* 15: 71–72.

Slabbekoorn, H. & Peet, M. (2003). Birds sing at a higher pitch in urban noise. *Nature* 424: 267.

Vergne, A.L., Avril, A., Martin, S. & Mathevon, N. (2007). Parent-offspring communication in the Nile crocodile (*Crocodylus niloticus*): evidence of pre-hatching calls. *Naturwissenschaften* 94: 431–434.

Vergne, A.L., Pritz, M.B. & Mathevon, N. (2009). Acoustic communication in crocodilians: from behaviour to brain. *Biological Reviews* 84: 391–411.