

DIFERENCIACIÓN DEL SEXO DEL GORRIÓN DE BAIRD (*Centronyx bairdii*) POR MEDIO DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES Y DATOS MORFOMÉTRICOS

SEX DIFFERENTIATION OF THE BAIRD SPARROW (*Centronyx bairdii*) THROUGH ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS AND MORPHOMETRIC DATA

Martin E. **Pereda-Solís**¹, Francisco **García-Fernández**², Daniel **Sierra-Franco**¹,
José H. **Martínez-Guerrero**^{1*}, Irene **Ruvalcaba-Ortega**³, Erin **Hennegan-Strasser**⁴

Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Juárez del Estado de Durango. Km 11.5, Carretera Durango-Mezquital, 34000, Durango, Durango, México. (mepereda@ujed.mx), (dan_1015@hotmail.com), (che_hugo1@hotmail.com). ²E.T.S. de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural, Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria s/n. 28040 Madrid, España. (francisco.garcia@upm.es). ³Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León. Avenida Universidad s/n, Ciudad Universitaria, 66455. San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. (irene.ruvalcabart@uanl.edu.mx). ⁴Bird Conservancy of the Rockies, Fort Collins, Colorado, USA. (erin.strasser@birdconservancy.org)

RESUMEN

Las estimaciones indican que 148 especies de aves en Norteamérica enfrentan amenaza alta o severa, pues sus poblaciones están disminuyendo. El gorrión de Baird (*Centronyx bairdii*) es una de las especies con declive poblacional, presenta plumaje monomórfico y su sexo no se puede determinar a simple vista. La determinación del sexo de las aves permite conocer su comportamiento social y proporción en la dinámica de sus poblaciones. Un método de clasificación es el de redes neuronales artificiales y se ha utilizado en diversos campos, como la clasificación de plantas y semillas y la diferenciación de especies productoras de madera. En el ámbito de la ornitología se ha utilizado poco. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue desarrollar una red neuronal artificial para diferenciar el sexo de los gorriónes de la especie *Centronyx bairdii*, con datos zoométricos obtenidos en campo. La hipótesis fue que las redes neuronales artificiales pueden predecir el sexo de las aves de la especie *Centronyx bairdii*. La red neuronal construida a partir de los datos de peso, cuerda alar, longitud de cola, culmen, ancho del pico y profundidad del pico de 111 aves, permitió diferenciar el sexo de la especie con grado de certeza de 92.3%.

Palabras clave: *Centronyx bairdii*, redes neuronales artificiales, zoometría, plumaje monomórfico, método de sexado.

ABSTRACT

Estimates indicate that 148 species of birds in North America face a high or severe threat, because their populations are decreasing. The Baird sparrow (*Centronyx bairdii*) is one of the species with population decline, it presents monomorphic plumage and sex cannot be determined at plain sight. Sex determination in birds allows understanding their social behavior and proportion regarding population dynamics. Artificial neural networks are used as a classification method which has been used in various fields, such as plant and seed classification, and species differentiation of timber species. In the scope of ornithology, it has been scarcely used. Therefore, the objective of this study was to develop an artificial neural network to differentiate the sex of sparrows of the species *Centronyx bairdii*, with zoometric data obtained in the field. The hypothesis was that artificial neural networks can predict the sex of the birds of the species *Centronyx bairdii*. The neural network built from the data of weight, wing chord, tail length, culmen, width of the beak and depth of the beak of 111 birds, allowed differentiating the sex of the species with a degree of certainty of 92.3%.

Key words: *Centronyx bairdii*, artificial neural networks, zoometry, monomorphic plumage, sex determination method.

* Autor para correspondencia ♦ Author for correspondence.

Recibido: octubre, 2018. Aprobado: julio, 2019.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 54: 353-365. 2020.

INTRODUCCIÓN

Las estimaciones indican que en Norteamérica 148 especies de aves enfrentan amenaza alta o severa, ya que sus poblaciones están disminuyendo. Esta situación desde 1970 es grave en particular en el caso de las aves de pastizal, porque la disminución en sus poblaciones continentales se ha estimado en hasta 70% (ICOAN, 2016). El gorrión de Baird (*Centronyx bairdii*) es un ave de pastizal nativa del sur de Canadá y norte de EUA, que en invierno emigra a regiones del Desierto Chihuahuense, como Arizona, Nuevo México y Texas (EUA), y Chihuahua, Sonora, Durango y Coahuila (México) (CEC, 2013). Esta especie presenta declive poblacional de 2.8% (Sauer *et al.*, 2017).

Una característica física de esta especie es que posee plumaje monomórfico y su sexo no se puede determinar a través de su color u otras características observables a simple vista, fuera de la temporada reproductiva. Esta situación es importante porque la determinación del sexo de las aves permite conocer la proporción de machos y hembras (PMH) de una población la cual es una variable fundamental para estudios demográficos. Desde el punto de vista biológico la PMH representa una función importante para conocer la competencia durante el apareamiento, sistemas de apareamiento y cuidado parental de los pollos (McNamara *et al.*, 2000). Las variaciones de la PMH también proporcionan información de utilidad para comprender procesos evolutivos que afectan el comportamiento social de aves silvestres, así como sus implicaciones en la dinámica poblacional, salud y conservación de la biodiversidad (Székely *et al.*, 2014). Por lo tanto, la diferenciación del sexo en esta especie es un punto de suma importancia.

Entre las técnicas desarrolladas para determinar el sexo de especies de aves monomórficas, están la disección exploratoria (Risser, 1971), el uso de la bioacústica para el análisis del canto y llamados (Bourgeois *et al.*, 2007), estudios etológicos (Flux e Innes, 2001) y los modelos predictivos como funciones discriminantes (Dechaume-Moncharmont *et al.*, 2011); también se usan técnicas basadas en el análisis de ADN (Fridolfsson y Ellegren, 1999). Sin embargo, las técnicas moleculares requieren entrenamiento, permisos para la recolecta de sangre o tejidos y son más costosas que las técnicas de campo.

Las redes neuronales artificiales (RNA) son una herramienta matemática usada como elemento de

INTRODUCTION

Estimates indicate that in North America there are 148 species of birds facing a high or severe threat, since their populations are decreasing. This situation since 1970 is serious particularly in the case of grassland birds, since the decrease in their continental populations has been estimated in up to 70% (ICOAN, 2016). The Baird sparrow (*Centronyx bairdii*) is a grassland bird from southern Canada and northern USA, which migrates during Winter to regions of the Chihuahuan Desert, such as Arizona, New Mexico and Texas (USA), and Chihuahua, Sonora, Durango and Coahuila (Mexico) (CEC, 2013). This species presents a population decline of 2.8% (Sauer *et al.*, 2017).

A physical characteristic of this species is that it has monomorphic plumage and its sex cannot be determined through its color or other characteristics that are observable at plain sight, but on the reproductive season. This situation is important because sex determination of birds allows knowing the proportion of males and females (PMF) of a population which is a fundamental variable for demographic studies. From the biological point of view, the PMF represents an important function to understand competition during mating, mating systems and parental care of chicks (McNamara *et al.*, 2000). The variations in PMF also provide useful information to understand evolutionary processes that affect social behavior of wild birds, as well as their implications in the population dynamics, health and conservation of biodiversity (Székely *et al.*, 2014). Therefore, sex determination in this species is a very important point.

Among the techniques developed to determine the sex of monomorphic bird species there are: exploratory dissection (Risser, 1971), use of bioacoustics for the analysis of songs and calls (Bourgeois *et al.*, 2007), ethologic studies (Flux and Innes, 2001), and predictive models such as discriminant functions (Dechaume-Moncharmont *et al.*, 2011); techniques based on DNA analysis are also used (Fridolfsson and Ellegren, 1999). However, molecular techniques require training, permissions for the collection of blood or tissues, and they are more expensive than field techniques.

Artificial neural networks (ANNs) are a mathematical tool used as an element of modelling and classification that is characterized by its great

modelización y clasificación que se caracterizan por su gran capacidad para el tratamiento de grandes conjuntos de datos (Pérez y Martín, 2003). Ellas se basan en sistemas neuronales biológicos que imitan su capacidad de aprender y llegar a una solución a partir de una serie de ejemplos, para luego aplicar dicho conocimiento y producir un resultado coherente frente a datos de entrada desconocidos (Pérez y Martín, 2003). Como método de clasificación las RNA se usan de manera amplia en diversos campos con resultados satisfactorios. Tanto para clasificación de plantas y semillas, y diferenciación de especies leñosas (Burks *et al.*, 2005; por García-Esteban *et al.*, 2009; Esteban *et al.*, 2017), como para la clasificación de defectos en la madera (Ramírez y Chacón, 2005).

Sin embargo, en el ámbito de la ornitología y disciplinas similares no se utilizan mucho y, cuando ocurre, ha sido para distinguir el canto entre especies (Juang y Chen, 2007), y en pocas ocasiones para diferenciar el sexo (Jennings *et al.*, 2008). Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue desarrollar una red neuronal artificial para la diferenciación del sexo de los gorriónes de la especie *C. bairdii*, migratoria de Norteamérica con plumaje monomórfico en ambos sexos, a partir de datos zoométricos tomados en campo. La hipótesis fue que las redes neuronales artificiales pueden predecir con precisión relativa el sexo de las aves de la especie *Centronyx bairdii*.

MATERIALES Y MÉTODOS

La recolecta de aves se realizó durante el invierno 2013-2014 en dos sitios del Desierto Chihuahuense. El primero en el Rancho "Santa Teresa" ubicado en el noroeste del estado de Durango en la región de Cuchillas de la Zarca, y el segundo en el Rancho "El Uno" localizado al noroeste del municipio de Janos, Chihuahua, México (Figura 1).

Las aves capturadas fueron 111 de la especie *C. bairdii* en ambas áreas de estudio; 82 en el Rancho "Santa Teresa" y 29 en "El Uno". La captura de aves (permiso de recolecta de SEMARNAT SPGA/DGVS/13360/14) se realizó con el uso de cuatro redes de niebla fabricadas con poliéster negro modelo KTX de Avian Research Supplies, AFO, de 36 mm de malla, 2.6 m de alto por 12 m de largo, y con la participación de 6 a 25 personas se utilizó el método de arreo de las aves hacia las redes (Panjabi y Beyer, 2010).

En cada ave capturada se colocó un anillo metálico #1 del United States Geological Survey (USGS, Permiso Federal 22415)

capacity for the treatment of large sets of data (Pérez and Martín, 2003). They are based on biological neural systems that imitate their capacity to learn and reach a solution from a series of examples, applying this knowledge later to produce a coherent result facing unknown input data (Pérez and Martín, 2003). As a classification method, ANNs are used widely in different fields with satisfactory results. Both for plant and seed classification, and for differentiation of woody species (Burks *et al.*, 2005; García-Esteban *et al.*, 2009; Esteban *et al.*, 2017), and defects classification in wood (Ramírez and Chacón, 2005).

However, in the sphere of ornithology and similar disciplines ANNs are not frequently used and, when it happens, it has been to distinguish the song among species (Juang and Chen, 2007), and sometimes to differentiate sex (Jennings *et al.*, 2008). Therefore, the objective of this study was to develop an artificial neural network for sex differentiation of sparrows of the species *C. bairdii*, migratory from North America with monomorphic plumage in both sexes, from zoometric data measured in the field. The hypothesis was that artificial neural networks can predict with relative accuracy the sex of birds of the species *Centronyx bairdii*.

MATERIALS AND METHODS

Bird collection was performed during winter 2013-2014 in two sites of the Chihuahuan Desert. The first in the Rancho "Santa Teresa" located in the northwest of the state of Durango, in the region of Cuchillas de la Zarca, and the second in Rancho "El Uno" located in the northwest of the municipality of Janos, Chihuahua, Mexico (Figure 1).

The birds captured were 111 of the species *C. bairdii* in both study areas: 82 in Rancho "Santa Teresa" and 29 in "El Uno". Bird capture (collection permit from SEMARNAT SPGA/DGVS/13360/14) was performed with the use of four fog nets made with black polyester model KTX from Avian Research Supplies, AFO, of 36 mm mesh, 2.6 m high by 12 m long, and with the participation of 6 to 25 people the bird-driving method was used towards the nets (Panjabi and Beyer, 2010).

In each bird captured, a #1 metallic ring of the United States Geological Survey (USGS, Federal Permit 22415) was placed, and morphometric measures were taken (Figure 2) as follows: weight (g), wing chord (mm), tail length (mm), culmen (mm), beak width (mm) and beak depth (mm). A metallic ruler of 150 mm WING15ECO from AVINET® was used to measure the wing chord and the tail length, to measure the peak a Vernier

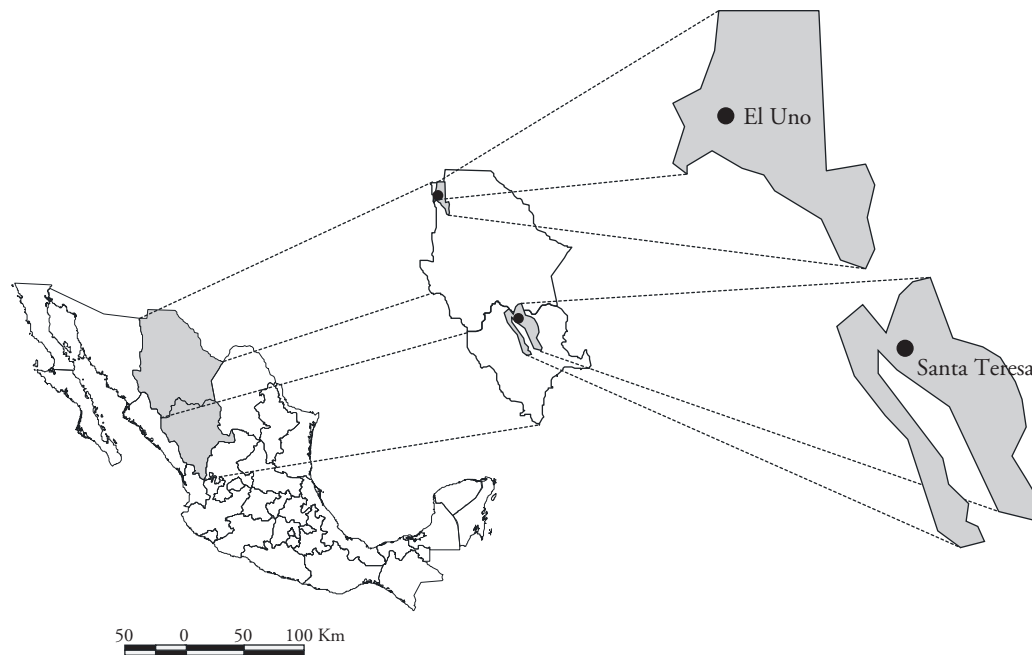


Figura 1. Localización de los sitios de colecta de las aves: Rancho “Santa Teresa” y Rancho “El Uno”.
Figure 1. Collection sites of birds: Rancho “Santa Teresa” and Rancho “El Uno”.

y se tomaron las medidas morfométricas (Figura 2) de peso (g), cuerda alar (mm), longitud de cola (mm), culmen (mm), ancho del pico (mm) y profundidad del pico (mm). Para medir la cuerda alar y longitud de cola se utilizó una regla metálica para ala de 150 mm WING15ECO de AVINET®, para las medidas del pico se usó un calibrador vernier modelo SPI 150 mm de AVINET® y para determinar el peso de las aves se utilizó una báscula OHAUS® (Mod. CS 2000, capacidad de 2000g y un 0.1g de precisión). Una vez registrados los datos, los individuos se liberaron en el mismo lugar de captura.

Las características morfométricas como la cuerda alar, longitud de la cola y medidas del pico son de mucha utilidad para identificar, estimar la edad y determinar el sexo de las aves (Pyle, 1997). La cuerda alar es la medida más simple de tomar, puede ser muy útil para representar el tamaño de un ave, y algunos autores recomiendan su inclusión en algunos modelos para estimar la condición corporal de las aves (Delong y Gessaman, 2001). El método usado en este estudio es el denominado cuerda alar sin aplastar que es la medida más utilizada y con resultados más consistentes (Pyle, 1997). Para su medición en un ave se usa una regla delgada con un tope perpendicular donde se marca el inicio de la escala. Esta regla se inserta bajo el ala (Figura 2A) y se hace la medición hasta donde termina la pluma primaria más externa (p9).

La longitud de la cola también es una característica de utilidad para la identificación, el sexado y la estimación de la edad

caliper model SPI 150 mm from AVINET®, and to determine the bird weight an OHAUS® scale (Mod. CS 2000 was used, with capacity of 2000g and 0.1g of accuracy). Once the data were recorded, the individuals were freed in the same place of capture.

The morphometric characteristics like wing chord, tail length and beak measurements are very useful to identify, estimate age, and determine the sex of birds (Pyle, 1997). The wing chord is the simplest measurement to take, it can be quite useful to represent the size of a bird, and some authors recommend its inclusion in some models to estimate the body condition of birds (Delong and Gessaman, 2001). The method used in this study is called wing chord without flattening, which is the most frequently used measurement and with more consistent results (Pyle, 1997). A thin ruler with a right-angled piece at the beginning of the scale was used to measure this length on each bird. This ruler was inserted under the wing (Figure 2A) and the measurement is taken to where it most external primary feather ends (p9).

The tail length is also a useful characteristic for the identification, sex determination and estimation of passerine birds. This measurement is defined as the distance between the tip of the longest flight feather to the point of insertion of the two central flight feathers (Figure 2B). A thin ruler is used for this measurement, which is placed perpendicularly to the tail and is inserted between the two central flight feathers, and this way the ruler must be touching the point of insertion of the feathers

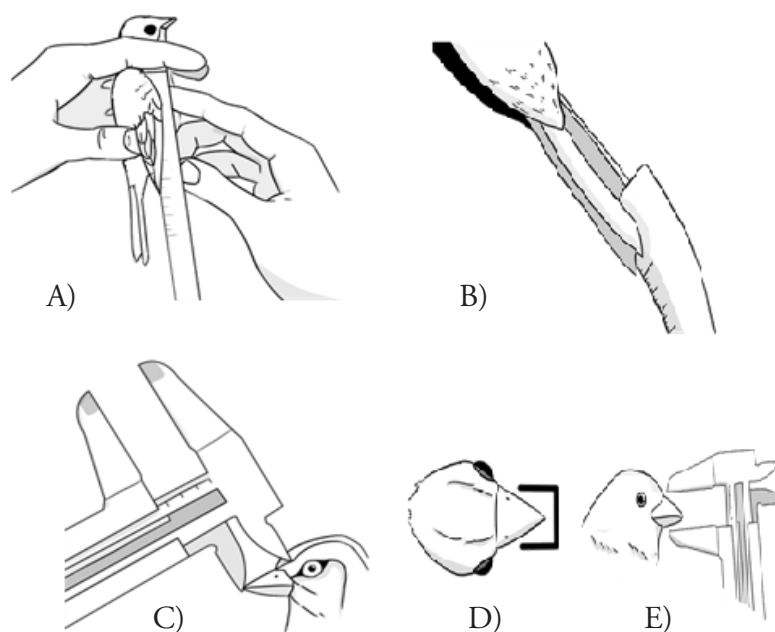


Figura 2. Proceso de medición de las características morfométricas de las aves. A) cuerda alar, B) longitud de la cola, C) culmen, D) ancho del pico y E) profundidad del pico.

Figure 2. Measuring process of morphometric characteristics of birds. A) wing chord, B) tail length, C) culmen, D) beak width and E) beak depth.

de las aves passeriformes. Esta medida se define como la distancia entre la punta de la pluma rectriz más larga hasta el punto de inserción de las dos plumas rectrices centrales (Figura 2B). Para esta medición se utiliza una regla delgada que se coloca de manera perpendicular a la cola y se inserta entre las dos plumas rectrices centrales, de esta forma la regla debe mantenerse tocando el punto de inserción de las plumas para tomar la lectura sobre la regla. También es importante asegurarse que las plumas rectrices más largas no estén ausentes, rotas o en periodo de muda. Existen diferentes métodos para medir las características del pico de las aves.

El culmen se define como la distancia entre la base donde nace el pico hasta su punta. Debido a la curvatura de la mandíbula superior en algunas especies, para esta medición se recomienda usar un calibrador Vernier (Figura 2C). También es importante asegurarse que la punta del pico no esté rota o deforme. Las mediciones de la profundidad y ancho del pico se toman en el extremo anterior de las fosas nasales, también se usa un calibrador Vernier. Para la profundidad del pico se coloca la punta externa del vernier sobre el culmen en la parte anterior de las fosas nasales y la punta interna del vernier debajo de la mandíbula inferior de tal manera que el vernier quede orientando en un ángulo de 90°

to take the reading on the ruler. It is also important to make sure that the longest flight feathers are not missing, broken or in molting period. There are different methods to measure the characteristics of the bird beaks.

The culmen is defined as the distance from the base where the beak starts up to its tip. Because of the curvature in the superior jaw in some species, a caliper is recommended for this measurement (Figure 2C). It is also important to make sure that the tip of the beak is not broken or deformed. The measurements of the depth and width of the beak are taken in the anterior end of the nasal cavities, a caliper is also used. For the beak depth the external point of the caliper is placed on the culmen on the anterior part of the nasal cavities and the internal point of the caliper under the inferior jaw so that the caliper is placed at an angle of 90° in relation to the axis of the beak (Figure 2E); for this measurement it is important that the beak is completely closed. Beak must be opened to measure beak width; the caliper is also opened until the point where it touches the anterior part of the nasal cavities (Figure 2D).

Bird weight is a characteristic variable due to the condition of individuals, stomach contents, season or stage of the life cycle for each species in particular. Therefore, Pyle (1997) suggested

en relación con el eje del pico (Figura 2E), para esta medición es importante que el pico esté completamente cerrado. Para medir el ancho del pico se abre y desplaza el vernier hasta el punto donde se detiene con la parte anterior de las fosas nasales (Figura 2D).

El peso de las aves es una característica variable debido a la condición de los individuos, contenidos estomacales, temporada o etapa del ciclo de vida de cada especie en particular. Por esta razón Pyle (1997) sugirió que esta medida no es relevante para determinar la edad, y sexo de las aves. Sin embargo, Sierra-Franco (2018)⁵ la usó en funciones discriminantes y análisis multivariados para predecir con cierto grado de precisión (80-90%) el sexo en las especies *C. bairdii* y *A. savanarum*.

Para realizar el sexado molecular se recolectó una pluma por individuo (cuarta rectriz derecha), la cual se almacenó en un sobre de papel a temperatura ambiente, y después las plumas se enviaron a la Universidad Autónoma de Nuevo León para su análisis. El ADN genómico se obtuvo utilizando el KIT “DNAeasyTissue Kit” con el protocolo de la casa comercial (Qiagen, Valencia, CA, USA). Para el sexado molecular se utilizaron los iniciadores 2550F/2718R (Fridolfsson y Ellegren, 1999).

Redes neuronales artificiales

Las redes neuronales se definen como un sistema computacional que imita las capacidades computacionales de los sistemas biológicos y utiliza un gran número de elementos (funciones matemáticas) interconectados y dispuestos en diferentes capas. El tipo de red se determina por el tipo de función que se utiliza, así como su disposición en las diferentes capas. Para este estudio se eligió una red neuronal tipo perceptrón multicapa. Su carácter como “aproximador de funciones” universal (Hornik, *et al.*, 1989) le permite modelar relaciones no lineales complejas y extraer conocimiento a partir de una serie de ejemplos, para luego aplicarlo a situaciones desconocidas.

El perceptrón multicapa se compone de tres capas conectadas hacia adelante, una capa de entrada, una capa oculta y una capa de salida. Durante el proceso de desarrollo (entrenamiento), la capa de entrada recibe los valores iniciales de las variables, la capa de salida muestra los resultados de la red, y la capa oculta realiza las operaciones destinadas a obtener la salida (Figura 3). Dichas capas se forman por *funciones de transferencia* interconectadas entre sí, las cuales son capaces de autoajustar la ponderación de sus conexiones a partir de unos datos de entrada y salida conocidos.

La capa de entrada tiene tantas neuronas como variables de entrada existen y la de salida tantas como salidas produce la red. Sin embargo, no hay una regla definida para conocer cuántas

that this measurement is not relevant to determine age and sex of the birds. However, Sierra-Franco (2018)⁵ used it in discriminant functions and multivariate analyses to predict with a certain degree of accuracy (80-90%) the sex of species *C. bairdii* and *A. savanarum*.

Molecular sex determination was performed with one feather collected per individual (fourth right flight feather), which was stored in a paper envelope at room temperature, and then the feathers were sent to the Universidad Autónoma de Nuevo León for their analysis. Genomic DNA was obtained using the “DNAeasyTissue Kit” with the protocol of the commercial house (Qiagen, Valencia, CA, USA). For the molecular sex determination, the primers 2550F/2718R were used (Fridolfsson and Ellegren, 1999).

Artificial neural networks

Neural networks are defined as a computational system that imitates the computational capacities of biological systems using a large number of interconnected elements (mathematical functions) and arranged in different layers. The type of network is determined by the type of function that it uses, as well as its layout in the different layers. For this study, a neural network of multilayer perceptron type was used. Its character as a universal function approximator (Hornik, *et al.*, 1989) allows it to model complex non-linear relationships, extracting knowledge from a series of examples to later apply it to unknown situations.

The multilayer perceptron is made up of three layers connected straightforward, an input layer, a hidden layer, and an output layer. During the process of development (training), the input layer receives the initial values of the variables, the output layer shows the results from the network, and the hidden layer performs the operations destined to obtain the output (Figure 3). These layers are formed by interconnected *transference functions*, which are capable of self-adjusting the weight of their connections from some known input and output data.

The input layer has as many neurons as there are input variables, and the output layer as many as the outputs produced by the network. However, there is no defined rule to understand how many sublayers should be in the hidden layer or how many neurons should compose it, and therefore the only way of obtaining it is through a trial-and-error process (Isasi and Galván, 2004). Even as there is a series of rules focused on optimizing ANN architecture, it should be always borne in mind, that an excessive number of neurons and layers can originate no extreme improvement in the generalization process but do slow down the training (Sha, 2007).

⁵Sierra-Franco, D. FMVZ UJED (dan_1015@hotmail.com).

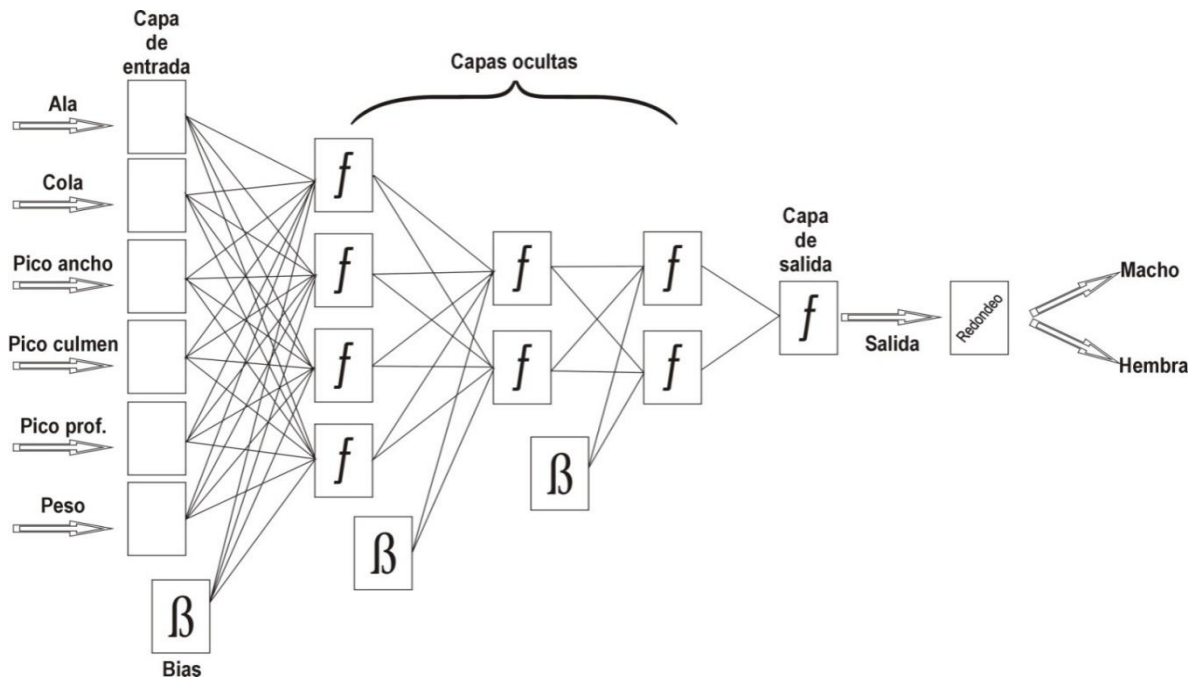


Figura 3. Esquema de la red neuronal obtenida para determinar el sexo del gorrión de Baird, mediante sus datos morfométricos.
Figure 3. Scheme of the neural network obtained to determine the sex of Baird sparrows, through their morphometric data.

subcapas debe haber en la capa oculta ni cuantas neuronas la deben componer, por ello la única forma de obtenerla es por medio de un proceso de ensayo y-error (Isasi y Galván, 2004). Aunque sí existen una serie de reglas enfocadas en optimizar la arquitectura de la RNA, siempre se debe tener en cuenta que un número excesivo de neuronas y capas puede no mejorar en exceso el proceso de generalización y sí ralentizar mucho el entrenamiento (Sha, 2007).

Antes del diseño de la red se realizó un análisis de componentes principales del vector de entrada, seguido de una transformación factorial para un nivel de explicación del 98% de la variabilidad, con el fin de determinar si existe algún tipo de correlación entre las variables de entrada, para reducir el tiempo de entrenamiento y mejorar los resultados de la red (Demuth *et al.*, 2002). Como criterio para la selección de las variables se tomó que su contribución a la variabilidad de la muestra fuera superior al 2% (Demuth *et al.*, 2002). Después se realizó un procesamiento preliminar de los datos con el fin de adecuarlos a la función de transferencia utilizada y mejorar la eficiencia de la red (Demuth *et al.*, 2002; Peng *et al.*, 2007).

$$X' = \frac{X - X_m}{s}$$

Before the network's design, a principal components analysis of the input vector was performed, followed by a factorial transformation in order to explain the 98% of variability, with the aim to determine whether there was any type of correlation among the input variables, to reduce the training time and improving network results (Demuth *et al.*, 2002). As a criterion for the selection of variables, it was considered that their contribution to the variability of the sample was higher than 2% (Demuth *et al.*, 2002). Then, a preliminary data processing was carried out with the aim of adapting them to the chosen transference function and to improve the efficiency of the network (Demuth *et al.*, 2002; Peng *et al.*, 2007).

$$X' = \frac{X - X_m}{s}$$

where X' : value after vector X normalization; X_m : vector X mean, S : vector X typical deviation.

The hyperbolic sigmoid tangent (*tansig*) was used as transference function, which is a variant of the hyperbolic tangent to obtain a faster output which is mathematically equivalent (Demuth *et al.*, 2002).

donde X' : valor después de la normalización del vector X ; X_m : media del vector X ; S : desviación típica del vector X .

Como función de transferencia se utilizó la tangente hiperbólica sigmoidea (*tansig*), la cual es una variante de la tangente hiperbólica por la cual se obtiene una salida más rápida y es matemáticamente equivalente (Demuth *et al.*, 2002).

$$f(x) = \frac{2}{1 + e^{(-2x)}} - 1$$

donde (x) : valor de salida de la neurona; x : valor de entrada de la neurona.

La salida de esta función es un número real comprendido en el intervalo (0,1), el cual se redondeó a cero para el caso de las hembras, y a uno para los machos. El algoritmo de retropropagación resiliente se utilizó en la etapa de entrenamiento (Demuth *et al.*, 2002), el cual mejora los resultados del aprendizaje en el caso de funciones de transferencia sigmoidea (Demuth *et al.*, 2002). Como método de entrenamiento de la red se utilizó el aprendizaje supervisado (Pérez y Martín, 2003; Isasi y Galván, 2004). En este método se presentan a la red tanto el vector de entrada como su solución y, por medio de ciclos sucesivos de aprendizaje, la red va obteniendo los valores de las conexiones internas.

Uno de los problemas principales que se presenta durante el proceso de entrenamiento es el sobreentrenamiento, el cual es un síntoma claro de que la red ha perdido capacidad de generalización y, por lo tanto, de confiabilidad (Isasi y Galván, 2004). Para evitarlo, el conjunto total de datos se dividió de manera aleatoria y sin repetición en tres subconjuntos: el subconjunto de entrenamiento (60% de los datos), el de validación (20% de los datos) y el de comprobación (20% de los datos).

El sobreentrenamiento se manifiesta en el momento en que el error en el conjunto de validación comienza a aumentar mientras que en el conjunto de entrenamiento sigue descendiendo. Por eso, durante el proceso de entrenamiento se comprobó cada 50 ciclos la evolución del error tanto en el conjunto de entrenamiento, como en el de validación.

El tercer subconjunto se utilizó para evaluar el grado de confiabilidad de la red, porque se presentan a la red solo los valores de entrada del conjunto y la salida se compara con el valor real (Isasi y Galván, 2004). Para evaluar los resultados finales se utilizó la fórmula del grado de confianza o porcentaje de precisión (García-Esteban *et al.*, 2009).

$$GC(\%) = 100 \cdot \frac{n_{corr}}{n_{tot}}$$

$$f(x) = \frac{2}{1 + e^{(-2x)}} - 1$$

where (x) : output value of the neuron; x : input value of the neuron.

The output of this function is a real number comprised in the interval (0,1), which was rounded to zero for the case of females, and one for males. The algorithm of resilient retro-propagation was used in the training stage (Demuth *et al.*, 2002), which improves the learning results for the case of functions of sigmoid transference (Demuth *et al.*, 2002). Supervised learning was used as training method of the network (Pérez and Martín, 2003; Isasi and Galván, 2004). In this method both the input vector and its solution are presented to the network and, through successive learning cycles, the network gradually obtains the values of internal connections.

One of the main problems that comes up during the training process is over-training, which is a clear symptom that the network has lost the capacity of generalization and, therefore, of reliability (Isasi and Galván, 2004). In order to avoid it, the total set of data was divided randomly and without repetition in three subsets: the training subset (60% of data), the validation subset (20% of data), and the verification subset (20% of data).

Overtraining is manifested in the moment when the error in the validation subset begins to increase while in the training subset it continues to descend. Therefore, during the training process, the evolution of the error was tested every 50 cycles both in the training subset and in the validation subset.

The third subset was used to evaluate the degree of reliability of the network, because only the input values of the set are presented to the network and the output is compared with the real value (Isasi and Galván, 2004). In order to evaluate the final results, the formula of the degree of confidence or percentage of accuracy was used (García-Esteban *et al.*, 2009).

$$GC(\%) = 100 \cdot \frac{n_{corr}}{n_{tot}}$$

where GC : degree of confidence; n_{corr} : number of successes; n_{tot} : total number of data.

A specific software was developed for the construction of the neural network in the language of MATLAB® Ver. 7.5.0. (R2007b), with the Neural Network Toolbox® ver. 5.1., and for all the statistical calculations the application Statistics Toolbox® ver. 6.1 was used.

donde GC : grado de confianza; n_{corr} : número de aciertos; n_{tot} : número total de datos.

Para la construcción de la red neuronal se desarrolló un programa específico en el lenguaje de MATLAB® Ver. 7.5.0. (R2007b), con la Neural Network Toolbox® ver. 5.1. y para todos los cálculos estadísticos se utilizó la aplicación Statistics Toolbox® ver. 6.1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Zoometría

En los 111 individuos del gorrión de Baird a los cuales se tomaron variables zoométricas, por medio del sexado molecular se identificaron 52 hembras y 59 machos (Cuadro 1). Al agrupar los datos morfométricos por sexo de los individuos, los promedios de las mediciones de ala, cola, profundidad del pico y peso fueron mayores ($p \leq 0.05$) en los machos que en las hembras.

Los promedios de los datos morfométricos obtenidos de ambos sexos son consistentes con las medidas publicadas por Green y colaboradores (2002) cuyos valores para la cuerda alar de las hembras fue de 65-72 mm ($n=30$) y en machos 67-75 mm ($n=30$), la longitud de la cola en las hembras fue de 45-54 mm ($n=20$) y en machos 49-57 mm ($n=20$). En relación con la medida del culmen, esta es ligeramente menor

RESULTS AND DISCUSSION

Zoometry

In 111 Baird sparrow individuals which were used to take zoometric variables, through the molecular sex determination, 52 females and 59 males were identified (Table 1). When grouping the morphometric data per sex of the individuals, the average of the measurements of wing, tail, beak depth, and weight were higher ($p \leq 0.05$) in males than in females.

The averages of morphometric data obtained from both sexes are consistent with the measurements published by Green *et al.* (2002), whose values for wing chord of the females were 65-72 mm ($n=30$) and males 67-75 mm ($n=30$), the tail length for females was 45-54 mm ($n=20$) and males 49-57 mm ($n=20$). Regarding the measurement of the culmen, it is slightly lower than what was reported by Ridgway (1904) who considered in the case of females a mean value of 10.4 mm (in the interval 10.2-10.7, $n=5$) and in males 10.7 mm (in the interval 10.4-10.9, $n=8$). A single and concrete reference was not found for the weight of females and males of this species; however, the values obtained in this study were found within the general amplitude of the interval (average 17.5 g, interval 15.0 - 20.3 g) considered by Ridgway (1904).

Cuadro 1. Variables zoométricas (Media \pm DE) de hembras y machos de gorriónes de Baird colectadas durante dos temporadas invernales (2013-2014 y 2014-2015) en dos sitios del Desierto Chihuahuense.

Table 1. Zoometric variables (Mean \pm SD) of females and males of Baird sparrow collected during two winter seasons (2013-2014 and 2014-2015) in two sites of the Chihuahuan Desert.

Variable	Hembras n=52	Machos n=59	P
Ala (mm)	67.2 \pm 1.90	70.1 \pm 2.14	< 0.0001
Cola (mm)	48.2 \pm 1.94	50.0 \pm 2.09	< 0.0001
Culmen (mm)	9.3 \pm 0.90	9.5 \pm 0.91	0.250
Ancho del pico (mm)	5.5 \pm 0.42	5.6 \pm 0.42	0.251
Profundidad del pico (mm)	5.5 \pm 0.38	5.7 \pm 0.34	0.012
Peso (g)	16.7 \pm 0.72	18.1 \pm 0.98	< 0.0001

Variabes zoométricas con $p \leq 0.05$ significa que hembras y machos son estadísticamente diferentes en esa característica ♦ Zoometric variable with $p \leq 0.05$ means that females and males are statistically different in that characteristic.

a la reportada por Ridgway (1904) quien consideró para el caso de las hembras un valor medio de 10.4 mm (en el intervalo 10.2-10.7, n=5) y en machos 10.7 mm (en el intervalo 10.4-10.9, n=8). No se encontró disponible una referencia única y concreta para el peso de hembras y machos de esta especie; sin embargo, los valores obtenidos en este estudio se encuentran dentro de la amplitud general del intervalo (promedio 17.5 g, intervalo 15.0 - 20.3 g) considerado por Ridgway (1904).

Red neuronal artificial

A partir del análisis de componentes principales, se observó que todas las variables zoométricas contribuyeron con más del 2% de la variabilidad de la muestra (Cuadro 2).

La red óptima desarrollada es un perceptrón multicapa con 4, 2 y 2 neuronas en las capas ocultas (Figura 3). Esto implica que la red desarrollada está matemáticamente definida ya que se dispone de 67 datos en el conjunto de entrenamiento frente a los 46 necesarios para tener definida matemáticamente la red (Sha, 2007). El proceso de entrenamiento fue de 1250 ciclos, a partir de los cuales el grado de confianza empezó a descender, en lo que se conoce como un sobreentrenamiento de la red (Isasi y Galván, 2004).

El grado de confianza obtenido en la fase de comprobación es 92.3% lo cual indica que el modelo puede distinguir entre macho y hembra con un nivel de aciertos mayor al 92% (Cuadro 3). Este porcentaje está por encima del límite de 85% que Guallar *et al.* (2010) consideraron aceptable en la diferenciación del sexo de passeriformes en la región del mediterráneo occidental.

Los resultados anteriores son similares a los obtenidos por otros autores que han usado redes neuronales artificiales para distinguir especies de plantas. Como, Moshou *et al.* (2001) obtuvieron porcentajes entre 70 y 95%, dependiendo del tipo de red neuronal utilizada, al distinguir entre plántulas de maíz y arvenses. También, Burks *et al.* (2005) documentaron 85 y 95% en la clasificación de arvenses, y Esteban *et al.* (2017) obtuvieron un 81% de aciertos al diferenciar *Pinus sylvestris* L. de *Pinus nigra* Arn. subsp. *salzmannii* a partir de datos anatómicos.

Aunque no en el ámbito de la ornitología, Jennings *et al.* (2008) compararon la capacidad humana de un grupo de 32 expertos con la capacidad de una

Cuadro 2. Varianza explicada por cada variable zoométrica.
Table 2. Variance explained by each zoometric variable.

Variable	Varianza explicada (%)
Ala	44.50
Cola	20.24
Culmen	12.76
Ancho del pico	11.02
Profundidad del pico	6.81
Peso	4.67

Artificial neural network

With the principal component analysis, it was observed that all zoometric variables contributed with a value higher than 2% of sample variability (Table 2).

The optimal network developed is a multilayer perceptron with 4, 2 and 2 neurons in the hidden layers (Figure 3). This implies that the network developed is mathematically defined since there are 67 data in the training set of the 46 which are necessary to mathematically define the network (Sha, 2007). The training process was 1250 cycles, from which the degree of confidence began to decrease, in what is known as network overtraining (Isasi and Galván, 2004).

The degree of confidence obtained in the verification phase is 92.3% which indicates that the model can distinguish between male and female with a level of successes higher than 92% (Table 3). This percentage is above the limit of 85% that Guallar *et al.* (2010) considered as acceptable in sex differentiation of passerines in the western Mediterranean region.

These previous results are similar to those obtained by other authors who have used artificial neural networks to differentiate plant species. For example, Moshou *et al.* (2001) who obtained

Cuadro 3. Resultados del proceso de entrenamiento de la red.
Table 3. Results in the training process of the network.

Fase	Grado de confianza (%)
Entrenamiento	90.6
Validación	76.2
Comprobación	92.3
Total	88.3

red neuronal para diferenciar el género y la especie de diferentes murciélagos del Reino Unido a partir de sus sonidos de ecolocalización. En su estudio concluyeron que la capacidad de la red neuronal era superior a la humana, con 92% de aciertos en el género y 62% de aciertos en especie, frente a los 86 y 56% de aciertos obtenidos por los expertos.

En los pocos casos de aplicación de redes neuronales en el ámbito de la ornitología, los resultados han sido muy similares a los obtenidos en este estudio. Por ejemplo, McIlraith y Card (1997) registraron 82% aciertos en la distinción de seis especies de aves, y Juang y Chen (2007) alcanzaron 95% de aciertos en la distinción del canto de diez especies de aves. Además, Cai *et al.* (2007) utilizaron un clasificador basado en una red neuronal para diferenciar el canto de 14 especies de aves y obtuvieron entre 76 y 85% de aciertos.

De manera similar, Raghuram *et al.* (2016) clasificaron el canto de 37 especies de aves mediante distintos métodos, obtuvieron con una red neuronal 94% de aciertos, superior a los otros métodos utilizados en su estudio, excepto el de los árboles de decisión. Mientras que Sierra-Franco (2018)⁵ aplicó una función discriminante para gorriónes del género *Ammodramus*, y para *C. bairdii* (n=111) y encontraron 81.1% de eficiencia en la predicción del género; las variables morfométricas utilizadas en la función fueron peso, culmen y longitud del ala. Para *A. savanarum* (n=196) la eficiencia fue 70.9% con las variables peso, longitud del ala y cola.

Counsilman *et al.* (1994) desarrollaron una función discriminante a partir de datos morfológicos para la diferenciación entre machos y hembras de las especies *Acridotheres tristis* y *A. javanicus*. En su estudio encontraron 89% de aciertos en machos y 76% en hembras de *A. tristis* y 81% en machos y 59% en hembras de *A. javanicus*.

Jakubas y Wojczulanis (2007) encontraron 65 y 70% al clasificar el sexo del mérgulo atlántico (*Alle alle*) de la colonia de anidamiento de Hornsund (South Spitsbergen). Y Guallar *et al.* (2010) obtuvieron entre 60 y 90% al clasificar el sexo de 25 especies de passeriformes en la región del mediterráneo occidental. Los porcentajes en su gran mayoría oscilan entre el 70 y el 80%, y sólo en el caso del *Cettia cetti* superaron el 90%. La precisión de nuestras estimaciones también es superior al resultado hallado por Bourgeois *et al.* (2007) al identificar el sexo de la pardela mediterránea (*Puffinus yelkouan*), el cual fue

percentages between 70 and 95%, depending on the type of neural network used, by distinguishing between maize seedlings and weeds. Also, Burks *et al.* (2005) documented 85 and 95% in the classification of weeds, and Esteban *et al.* (2017) obtained 81% of success when differentiated *Pinus sylvestris* L. from *Pinus nigra* Arn. subsp. *salzmannii* by using anatomical data.

Although not in the field of ornithology, Jennings *et al.* (2008) compared the human capacity of a group of 32 experts with the capacity of a neural network to differentiate the genus and species of different bats from their echolocation sounds in the United Kingdom. In their study those authors concluded that the capacity of the neural network was higher than the human capacity, showing 92% success in the gender and 62% success in the species, against the 86 and 56% success obtained by the experts.

In the few cases of application of neural networks in the field of ornithology, results have been very similar to those obtained in this study. For example, McIlraith and Card (1997) recorded 82% of success in the distinction of six bird species, and Juang and Chen (2007) reached 95% success in the distinction of the song of ten bird species. In addition, Cai *et al.* (2007) used a classifier based on a neural network to differentiate the song of 14 bird species and obtained between 76 and 85% of success.

Similarly, Raghuram *et al.* (2016) classified the song of 37 bird species through different methods; they obtained with a neural network 94% success, higher than other methods used in their study, except the decision trees. Whereas Sierra-Franco (2018)⁵ applied a discriminant function for sparrows of the genus *Ammodramus*, and for *C. bairdii* (n=111), and found 81.1% of efficiency in gender prediction, and the morphometric variables used in the function were weight, culmen and wing length. For *A. savanarum* (n=196) the efficiency was 70.9% with the variables weight, wing and tail length.

Counsilman *et al.* (1994) developed a discriminant function from morphologic data to differentiate between males and females of the species *Acridotheres tristis* and *A. javanicus*. In their study authors found 89% of success in males and 76% in females of *A. tristis*; and 81% success in males and 59% in females of *A. javanicus*.

Jakubas and Wojczulanis (2007) found 65 and 70% when classifying the sex of the Atlantic little auk (*Alle alle*) at the nesting colony of Hornsund

87% de aciertos con el uso de una función discriminante a partir de datos zoométricos.

CONCLUSIONES

Por medio del desarrollo de una red neuronal artificial se logró determinar el sexo de *Centronyx bairdii* con un grado de certeza aceptable. Las medidas morfométricas peso, cuerda alar, longitud de cola, culmen, anchura del pico y profundidad del pico son adecuadas para la diferenciación del sexo en individuos de esta especie.

El resultado obtenido con la técnica diseñada en este estudio es superior al encontrado por otros autores que han usado el método de la función discriminante para diferenciar el sexo de individuos en *C. bairdii* y en otras especies monomórficas.

LITERATURA CITADA

- Bourgeois, K., C. Curé, J. Legrand, E. Gómez-Díaz, E. Vidal, T. Aubin, and N. Mathevon. 2007. Morphological *versus* acoustic analysis: what is the most efficient method for sexing yelkouan shearwaters *Puffinus yelkouan*? J. Ornithol. 148: 261-269.
- Burks, T. F., S. A. Shearer, J. R. Heath, and K. D. Donohue. 2005. Evaluation of neural network classifiers for weed species discrimination. Biosystems Eng. 91: 293-304.
- Cai, J., D. Ee, B. Pham, P. Roe, and J. Zhang. 2007. Sensor network for the monitoring of ecosystem: Bird species recognition. Proc. 3rd IEEE International Conference on Intelligent Sensors Sensor Networks and Information. Melbourne, Australia, IEEE. pp: 293-298.
- CEC (Commission for Environmental Cooperation). 2013. Where do grassland birds winter? Density, abundance and distribution of wintering grassland passerines in the Chihuahuan Desert. Commission for Environmental Cooperation. Montreal, Canada. 30 p.
- Counsilman, J. J., K. Nee, A. K. Jalil, and W. L. Keng. 1994. Discriminant analysis of morphometric characters as a means of sexing mynas. J. Field Ornithol. 65: 1-7.
- Dechaume-Moncharmont, F.C., K. Monceau and F. Cezilly. 2011. Sexing birds using discriminant function analysis: A critical appraisal. Auk 128: 78-86.
- Delong, J. P., and J. A. Gessaman. 2001. A comparison of non-invasive techniques for estimating total body fat in sharp shinned and cooper's hawks. J. Field Ornithol. 72: 349-364.
- Demuth, H., M. Beale, and M. Hagan. 2002. Neural Network Toolbox User's guide, Version 4. The Mathworks Inc. Natic, MA. 450 p.
- Esteban, L. G., P. Palacios de, M. Conde, F. G. Fernández, A. García-Iruela, and M. González-Alonso. 2017. Application of artificial neural networks as a predictive method to differentiate the wood of *Pinus sylvestris* L. and *Pinus nigra* Arn. subsp. *salzmannii* (Dunal) Franco. Wood Sci. Technol. 51: 1249-1285.
- Flux, I., and J. Innes. 2001. A field technique for gender determination in North Island kokako (*Callaeas cinerea wilsoni*). Notornis 48: 217-223.
- Fridolfsson, A., and H. Ellegren. 1999. A simple and universal method for molecular sexing of nonratite birds. J. Avian Biol. 30: 116-121.
- García-Esteban, L., F. García-Fernández, P. de Palacios, R. Moreno Romero, N. Navarro Cano. 2009. Artificial neural networks in wood identification: the case of two Juniperus species from the Canary Islands. IAWA Journal 30: 87-94.
- Guallar, S., J. Quesada, G. Gargallo, S. Herrando, and J. M. Romero. 2010. Use of discriminant analysis in the sex determination of passerines breeding in the western Mediterranean. Rev. Catalana d'Ornitol. 26: 38-50.
- Green, M. T., P. E. Lowther, S. K. Jones, S. K. Davis, and B. C. Dale. 2002. Baird's Sparrow (*Centronyx bairdii*). The Birds of North America Online, Ithaca, NY, USA: Cornell Lab of Ornithology. <https://birdsna.org/Species-Account/bna/species/baispa/introduction> (Consulta: agosto 2018).
- Hernández-Pérez, J. A., M. A. García-Alvarado, G. Trystam, and

CONCLUSIONS

Through the development of an artificial neural network, it was possible to determine the sex of *Centronyx bairdii* with an acceptable degree of confidence. The morphometric measurements weight, wing chord, tail length, culmen, beak width and beak depth are adequate for the sex differentiation in individuals of this species.

The result obtained with the technique designed in this study is superior than the one found by other authors that have used the method of discriminant function to differentiate the sex of individuals in *C. bairdii* and other monomorphic species.

—End of the English version—



- B. Heyd. 2004. Neural networks for the heat and mass transfer prediction during drying of cassava and mango. *Innovate Food Sci. Eng. Technol.* 5: 57-64.
- Hornik, K., M. Stinchcombe, and H. White. 1989. Multilayer feedforward networks are universal approximators. *Neural Networks* 2: 359-366.
- ICOAN (Iniciativa para la Conservación de las Aves de América del Norte). 2016. El Estado de las Aves de Norteamérica 2016. Ontario, Canada: Environment and Climate Change Canada: <http://www.es.stateofthebirds.org> (Consulta: mayo 2018).
- Isasi, P., e I. M. Galván. 2004. Redes Neuronales Artificiales, un Enfoque Práctico. Pearson Educación S.A., Madrid. 240 p.
- Jakubas, D., and K. Wojczulanis. 2007. Predicting the sex of doves by discriminant analysis. *Waterbirds* 30: 92-96.
- Jennings, N., S. Parson, and M. J. O. Pocock. 2008. Human vs. machine: Identification of bat species from their echolocation calls by humans and by artificial neural networks. *Can. J. Zool.* 86: 371-377.
- Juang, C. F., and T. M. Chen. 2007. Bird song recognition using prediction-based recurrent neural fuzzy networks. *Neurocomputing* 71: 121-130.
- McIlraith, A. L., and H. C. Card. 1997. Bird song identification using artificial neural networks and statistical analysis. *IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Engineering Innovation.* Saint Johns, Newfoundland, Canada. pp: 63-66.
- McNamara, J. M., T. Székely, J. N. Webb, and A. Houston. 2000. A dynamic game-theoretic model of parental care. *J. Theor. Biol.* 205: 605-623.
- Moshou, D., E. Vrindts, B. De Ketelaere, J. De Baerdemaeker, and H. Ramon. 2001. A neural-network-based plant classifier. *Comput. Electronics Agric.* 31: 5-16.
- Panjabi, A., and L. Beyer. 2010. Desert Grassland Bird Conservation: Is low winter survival driving population declines? Phase I. Final report I-MXPLAT-NPS-08-02. Brighton, CO, EUA, Rocky Mountain Bird Observatory. 13 p.
- Peng, G., X. Chen, W. Wu, and X. Jiang. 2007. Modelling of water sorption isotherm for corn starch. *J. Food Eng.* 80: 562-567.
- Pérez, M. L., y Q. Martín. 2003. Aplicaciones de las redes neuronales a la estadística. Cuadernos de Estadística. La Muralla S.A. Madrid. 140 p.
- Pyle, P. 1997. Identification Guide to North American Birds. Braun-Brumfield Inc. Bolinas, California. 732 p.
- Raghuram, M. A., N. R. Chavan, R. Belur, and S. G. Koolagudi. 2016. Bird classification based on their sound pattern. *Int. J. Speech Technol.* 19: 791-804.
- Ramírez, G., y M. I. Chacón. 2005. Clasificación de defectos en madera utilizando redes neuronales artificiales. *Comput. Sistemas* 9: 17-27.
- Ridgway, R. 1904. The Birds of North and Middle America: A Descriptive Catalogue of the Higher Groups, Genera, Species, and Subspecies of Birds Known to Occur in North America, from the Arctic Lands to the Isthmus of Panama, the West Indies and Other Islands of the Caribbean Sea, and the Galapagos Archipelago. US Government Printing Office. Washington D. C. 796 p.
- Risser, A. C. 1971. A technique for performing laparotomy on small birds. *Condor* 73: 376-79.
- Sauer, J. R., D. K. Niven, J. E. Hines, D. J. Ziolkowski, Jr, K. L. Pardieck, J. E. Fallon, and W. A. Link. 2017. The North American Breeding Bird Survey, Results and Analysis 1966 - 2015. USGS Patuxent Wildlife Research Center, Laurel, MD Version 2.07.2017.
- Sha, W. 2007. Comment on the issues of statistical modelling with particular reference to the use of artificial neural networks. *Applied Catalysis A General* 324: 87-89.
- Székely, T., A. Liker, R. P. Freckleton, C. Fichtel, and P. M. Kappeler. 2014. Sex-biased survival predicts adult sex ratio variation in wild birds. *Proc. Royal Society B* 281: 20140342.
- The MathWorks, Inc. 2007. MATLAB(r) Ver. 7.5.0. (R2007b). <https://es.mathworks.com/products/matlab.html> (Consulta: octubre, 2018)