



Patrones comportamentales y detección de causas de mortalidad en águila perdicera (*Aquila fasciata*) a través del acelerómetro triaxial de emisores GPS-GSM

Juan José Iglesias-Lebrija^{1,*} , Marta García² , José Manuel Serrano² , Ernesto Álvarez¹, Sergio de la Fuente¹ , Miguel Marco¹ , Manuel Galán¹ , Virginia Moraleda¹

(1) Grupo para la Rehabilitación de la Fauna Autóctona y su Hábitat. C/Monte del Pilar s/n Majadahonda. 28220. Madrid, España.

(2) Departamento de Biodiversidad, Ecología y Evolución. Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Complutense de Madrid. C/José Antonio Novais, 12. Ciudad Universitaria. 28040. Madrid, España.

* Autor de correspondencia: J.J Iglesias-Lebrija [jjiglesias@grefa.org]

> Recibido el 08 de diciembre de 2022 - Aceptado el 15 de julio de 2023

Como citar: Iglesias-Lebrija, J.J., García, M., Serrano, J.M., Álvarez, E., de la Fuente, S., Marco, M., Galán, M., Moraleda, V. 2023. Patrones comportamentales y detección de causas de mortalidad en águila perdicera (*Aquila fasciata*) a través del acelerómetro triaxial de emisores GPS-GSM. *Ecosistemas* 32(2): 2506. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2506>

Patrones comportamentales y detección de causas de mortalidad en águila perdicera (*Aquila fasciata*) a través del acelerómetro triaxial de emisores GPS-GSM

Resumen: El acelerómetro de los emisores GPS es una herramienta muy útil que permite inferir patrones comportamentales en fauna silvestre. Una de las aplicaciones más interesantes en especies amenazadas es determinar sus causas de mortalidad. La mayoría de los dispositivos GPS-GSM para seguimiento de fauna actualmente llevan incorporados un medidor de aceleración en los tres ejes del espacio, denominado acelerómetro, el cual posibilita la interpretación de los cambios posición en cada momento del animal. En este estudio utilizamos ejemplares de águila perdicera en cautividad (n=4) y en el medio natural (n=72) equipados con emisores GPS-GSM mediante arnés torácico de la marca Ornitela y el modelo OT-30 para inferir comportamientos de manera remota mediante interpretación de las gráficas de acelerometría. Los resultados muestran que la información que aporta el eje "x" en la posición equilibrada del emisor, el eje "y" en los balanceos hacia adelante y el eje "z" que complementa a los anteriores, permiten llevar a cabo una interpretación visual rápida de comportamientos básicos como alimentación, vuelo, peleas territoriales, descanso, incubación, o ceba de los pollos. Pero que adquiere una relevancia muy importante en la determinación de la causa de la muerte, especialmente de especies amenazadas, lo cual puede tener repercusión jurídica en el caso de condenas penales.

Palabras clave: cuadro postural; etología; mortalidad

Behavioural patterns and detection of mortality causes in Bonelli's eagle (*Aquila fasciata*) using GPS-GSM transmitter triaxial accelerometers

Abstract: The accelerometer of GPS transmitters is a very useful tool for inferring behavioural patterns in wildlife. One of the most interesting applications in endangered species is to determine the causes of mortality. Most GPS-GSM devices for wildlife tracking currently incorporate an acceleration meter in the three axes of space, known as accelerometer, which allows the interpretation of changes in the animal's position at any given moment. In this study we used Bonelli's eagles in captivity (n=4) and in the wild (n=72) equipped with Ornitela GPS-GSM transmitters model OT-30 using thoracic harnesses to infer behaviour remotely by interpreting the accelerometer graphs. The results show that the information provided by the "x" axis in the balanced position of the transmitter, the "y" axis in the forward swings and the "z" axis, which complements the previous ones, allow a quick visual interpretation of basic behaviours such as feeding, flight, territorial fights, resting, incubation or chick feeding. But it is very important in determining the cause of death, especially in endangered species, which can have legal repercussions in the case of criminal convictions.

Keywords: Carcass position; ethology; mortality

Introducción

El siglo XXI ha supuesto un avance exponencial de la tecnología empleada para el seguimiento remoto de las especies animales (Cagnacci et al. 2010; Tomkiewicz et al. 2010; Bridge et al. 2011). Los primeros emisores con capacidad de envío de información geoespacial a través del sistema satelital Argos fueron colocados en la década de los ochenta del siglo XX a cisnes (*Cygnus buccinator*; *C. colombianus*), petreles gigantes (*Macronectes giganteus*) y águilas calvas (*Haliaeetus leucocephalus*) y ofrecieron datos inéditos hasta

la fecha sobre sus desplazamientos y movimientos dispersivos (Strikwerda et al. 1986; Seegar et al. 1996). Poco a poco fueron incorporándose los primeros dispositivos que podían proporcionar posiciones GPS (Seegar et al. 1996). La evolución de estos aparatos ha ido en varias direcciones, se ha buscado disminuir su peso para ser colocados a un mayor número de especies distintas sin afectar su supervivencia, aumentar su vida útil, incrementar el número de localizaciones proporcionadas, aumentar su precisión por debajo de los 10 metros de error e incorporar sensores que proporcionen información adicional (Lass y Callihan 1993; Meyburg y Fuller 2007).

El acelerómetro triaxial cuantifica la aceleración en los tres ejes del espacio (Fig. 1) y comenzó a ser utilizado para comprender los comportamientos animales a partir de finales del siglo (Yoda et al. 1999, 2001). La colecta de datos de acelerometría no es muy costosa en términos de gastos de batería, pero sí lo es el envío de grandes paquetes de información almacenada o el análisis detallado de los patrones de comportamiento mediante programas y paquetes estadísticos específicos (Wilson et al. 2008). En algunas ocasiones, como en el caso de seguimiento de especies amenazadas, es necesario una rápida interpretación visual para poder actuar en el menor tiempo posible, por ejemplo en caso de detectar patrones de mortalidad, enfermedad o debilitamiento. El objetivo de este trabajo es evaluar si la interpretación visual de los acelerómetros permite identificar patrones comportamentales básicos y determinar casos de mortalidad. Para ello utilizaremos la experiencia obtenida en el marcaje de águilas perdiceras (*Aquila fasciata*) dentro de los proyectos Life Bonelli (LIFE 12 NAT/ES 000701) y AQUILA a-LIFE (LIFE 16 NAT/ES/000235).

Tras la experiencia obtenida para el águila perdicera o de Bonelli se pretende mostrar los patrones de actividades diarias como el vuelo, la alimentación o el descanso a partir de los datos de acelerometría registrados. Al igual que aspectos básicos de la reproducción como la incubación o la alimentación de los pollos. En el caso de ejemplares muertos que portaban emisor el acelerómetro mostró exactamente el cuadro postural del ejemplar pudiendo cla-

sificar la presunta causa de la muerte, y con ello anticipar las medidas a tomar por agentes de la autoridad si se tratara un hecho constitutivo de delito.

Material y Métodos

Se ha contado con la información aportada por 76 ejemplares de águila perdicera, 4 cautivos y 72 presentes en el medio natural. Estos ejemplares, juveniles (n=18) y adultos (n=58) fueron equipados entre 2019 y 2022 con emisores OT-30 de la marca comercial Ornitela (<https://www.ornitela.com>) de 30 gramos de peso. El peso de los emisores representa entre un 1.4% y un 1.7% del peso medio de las aves, muy por debajo del margen de seguridad recomendado para este tipo de rapaces (Kenward 2000). Estos dispositivos fueron colocados mediante el método de arnés torácico con teflón de 0,55 pulgadas tipo Garcelon con punto de ruptura (García et al. 2021). Con este sistema el emisor queda colocado en la espalda unos centímetros por debajo de la cintura escapular (Fig. 1).

Se han analizado los datos de acelerometría utilizando distintas configuraciones obteniendo valores de cambio de velocidad (cm/s²) de los ejes "x", "y", "z" a través de panel de control Ornitrack (<https://www.glosendas.net/cpanel/>). Con esta herramienta, además de poder filtrar por fechas, podemos obtener parámetros de porcentaje de batería, recarga (mA), o temperatura (°C) que pueden facilitar la comprensión del patrón comportamental o de la causa de muerte.

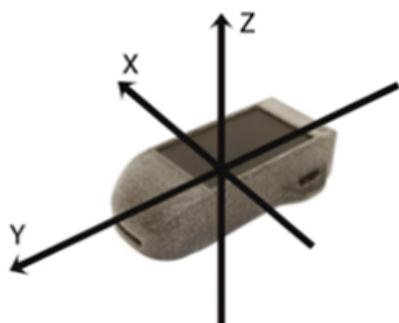
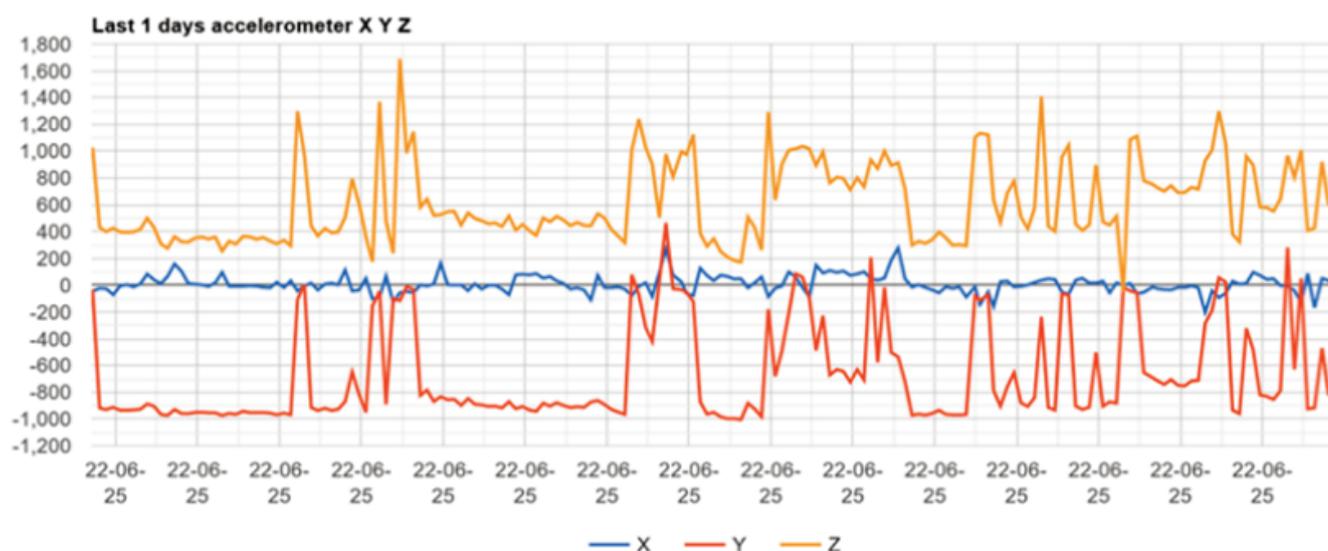


Figura 1. Visualización de emisor GPS-GSM de la marca Ornitela OT-30. Gráfico de 24 horas de los tres ejes espaciales programado cada 300 segundos. En la gráfica proporcionada en el eje horizontal aparece la fecha y en el eje vertical el valor registrado en cm/s².

Figure 1. Picture of an Ornitela GPS-GSM transmitter OT-30. 24 hours plot of the three spatial axes programmed every 300 seconds. In the plot, the date appears in the horizontal axis and the value in cm/s² in the vertical axis.

Estudio en cautividad

Inicialmente los comportamientos vitales de las aves han sido registrados en cautividad con cuatro ejemplares adultos de águila perdicera sin secuelas tras ser rehabilitadas, dos machos y dos hembras, durante dos meses y medio en una instalación del centro de recuperación de GREFA de 35 metros de largo, 15 metros de ancho y 6 metros de alto. La configuración utilizada para este estudio, fue igual tanto para machos como para hembras. Concretamente se obtuvo un registro de acelerómetro cada 15 o 30 segundos según el estado de las baterías. Se utilizó un sistema de grabación continuo de alta calidad de la marca Hikvision y modelo DS-2DE7225IW-AE presente en la instalación. Una vez depurada la información se procedió a su estudio por medio de un análisis lineal discriminante de varias categorías para los ejes espaciales y los comportamientos en el total del grupo de individuos (Li et al. 2006). Se definieron cinco actividades rutinarias: "Alimentación", "Descanso", "Desplazamiento", "Socialización" y "Otros". Para categorizar los diferentes comportamientos de las aves en función de los valores de los tres ejes que ofrece el acelerómetro se utilizó el programa *InfoStat* (InfoStat 2008).

Estudio en el medio natural

En el medio natural se ha realizado un estudio complementario ampliando el número de actividades registradas con menor cantidad de datos de acelerometría. Hemos comparado los registros del sensor del acelerómetro de 72 ejemplares, 38 machos y 34 hembras (juveniles n=58; adultos n=14), con los cuadros posturales de las actividades gracias a la utilización de escondites fotográficos, telescopios o cámaras de fototrampeo. Con el fin de optimizar descargas y una gestión adecuada para la duración de la batería a largo término, la configuración de los dispositivos ha sido la de obtener un registro de acelerómetro en los tres ejes espaciales en cada posición obtenida de GPS cada 300 segundos si la batería se encontraba por encima del 75% de su capacidad (configuración estándar). Los dispositivos fueron desconectados por la noche para ahorrar batería. Al tener registros puntuales de

acelerómetro cada 300 segundos los comportamientos que se pueden discernir son aquellos que duran al menos diez minutos y son mucho más variados que los que se pueden analizar en cautividad en un recinto cerrado. Se pretende mostrar los comportamientos más fácilmente discernibles en la gráfica del acelerómetro del panel de Ornitrack.

Resultados

Estudio en cautividad

En total se obtuvieron 107 horas de visualización de comportamientos de cuatro águilas perdiceras cautivas registrando 1759 datos de comportamiento distintos. En el análisis realizado para cada par de ejes, se observa que el que menor tasa de error muestra es el eje "y" por lo que por lo general discrimina mejor los comportamientos (Tabla 1).

De las 1759 muestras analizadas, 556 fueron mal clasificadas con un 68.4 % de clasificación correcta. De los cinco comportamientos estudiados para comprobar la precisión de la clasificación del análisis discriminante, los que tienen menor tasa de error y, por tanto, se discriminan mejor son la actividad de alimentación y de descanso (Tabla 2). En la Figura A1 se muestra la frecuencia de valores que aparecen en cada una de estas dos actividades. El eje "x", como se observa, muestra valores próximos a cero sin llegar a los extremos, es el eje que marca cómo de equilibrado está el emisor lateralmente. El eje "y" muestra valores muy negativos en descanso y muy positivos en alimentación. Sin embargo, el eje "z" muestra valores siempre altos en posiciones naturales del individuo, que se incrementan si el animal está comiendo o volando.

Estudio en el medio natural

Se han acumulado 144 posiciones de media por individuo y día, superando los 20 000 registros anuales. A diferencia del estudio en cautividad, en este caso, se tratan de observaciones descriptivas útiles para otros usuarios, pero no patrones reproducibles y discernibles estadísticamente.

Tabla 1. Tabla del análisis discriminante realizado con los cinco grupos de comportamientos para los valores de los tres ejes del acelerómetro por pares. La primera columna de cada eje muestra el número de muestra para cada comportamiento. La segunda columna, el porcentaje de error.

Table 1. Table of the discriminant analysis performed with five behaviours groups for the values of the three accelerometer axes. The first column of each axis shows the sample number for each behaviour. The second column shows the percentage error.

Grupo	Ejes X e Y		Ejes X y Z		Ejes Y y Z	
	Total	Error(%)	Total	Error(%)	Total	Error(%)
Alimentación	738	18.02	738	23.04	738	18.83
Descanso	503	12.84	503	17.89	503	17.05
Desplazamiento	200	55.38	200	52.82	200	41.54
Otro	281	75.80	281	85.99	281	84.08
Socializa	37	48.65	37	45.95	37	48.65
Total	1759	31.72	1759	36.67	1759	33.14

Tabla 2. Tabla de clasificación cruzada del análisis discriminante realizado con los cinco grupos de comportamiento considerados. Los números indican con qué frecuencia el análisis clasifica correctamente las muestras. La alimentación y el descanso son los mejor clasificados (menor % de error).

Table 2. Cross classification table of the discriminant analysis performed with the five behavioural groups considered. The numbers indicate how often the analysis correctly classifies the samples. Eating and resting are the best classified (lowest % error).

Grupo	Alimentación	Descanso	Desplazamiento	Otro	Socializa	Total	Error (%)
Alimentación	605	2	5	46	80	738	18.02
Descanso	6	415	61	7	14	503	17.50
Desplazamiento	6	16	112	32	34	200	44.00
Otro	10	13	86	52	120	281	81.49
Socializa	1	1	15	1	19	37	48.65
Total	628	447	279	138	267	1759	31.61

Alimentación

Las rapaces depredadoras que consumen presas de un tamaño mediano o grande normalmente tienen que eliminar el pelo o la pluma, por lo que el tiempo estimado que dedica a alimentarse varía entre 15-25 minutos, de modo que este comportamiento queda claramente registrado en la gráfica del acelerómetro ($n = 35$).

En la **Figura 2** las acotaciones verdes señalan periodos de alimentación que se visualizan con valores positivos altos del eje "y" en forma de sierra. En este caso, los registros de este eje indican que el emisor está moviéndose hacia abajo por su parte delantera (B) por lo que el animal se está alimentando activamente, sin embargo, los valores en torno a "0" indican periodos de vigilancia con el emisor en posición horizontal (A). El eje "x" se mantiene en torno a "0" y el eje "z" marca ligeras fluctuaciones manteniéndose en valores positivos altos.

Vuelo

El vuelo es uno de los comportamientos más fáciles de reconocer con las gráficas del acelerómetro. Usualmente, el eje "x" se mantiene en torno a cero cuando el emisor está equilibrado en la espalda del ave, el eje "y" toma valores en torno a cero también con ligeras variaciones y el eje "z" toma valores máximos, como se puede observar en las acotaciones marrones de la **Figura 3**. Si se trata de un vuelo direccional o dispersivo puede no presentar variaciones a lo largo de varias horas, sin embargo, en vuelos de caza, cortejo o en desplazamientos cortos, los aleteos son mucho mayores, por lo que los ejes no se mantienen de manera constante y experimentan mayores fluctuaciones.

Descanso

Al igual que en cautividad, gran parte del día las águilas perdiceras se encuentran en posición de descanso. Durante la noche, en las primeras horas de la mañana, en las últimas de la tarde o en días lluviosos, estos comportamientos son más fáciles de interpretar. Su postura es erguida y las gráficas de los tres ejes marcan la posición vertical del emisor. El eje "x" experimenta variaciones en torno a cero según descansen sobre una pata o sobre la otra, el eje "y" registra valores mínimos muy negativos y el eje "z" establece valores mínimos igualmente llegando incluso a cero. La acotación marrón de la **Figura 4** muestra periodos continuados de descanso con los ejes con escasas fluctuaciones.

Incubación

Las águilas perdiceras incuban durante 41 días (**Izquierdo y García 2018**). Este comportamiento es fácilmente discernible con la gráfica de los tres ejes del acelerómetro. Si bien, puede ser similar a la postura desarrollada durante un vuelo direccional, esta se encuentra más estable, en el mismo lugar y con variaciones del eje "x" según se encuentre el ejemplar tumbado hacia un lado o hacia el otro (acotaciones marrones). También se pueden observar los periodos de descanso o de giro de huevos, cuando el ejemplar se incorpora (acotaciones verdes) (**Fig. 5**).

Alimentación y cuidado de pollos pequeños

En esta fase, las águilas se encuentran parte del día tumbadas dando calor a los pollos y hay cebas periódicas. El gráfico observado es similar a la incubación y a la alimentación, pero con fluctuaciones continuas de los ejes a lo largo del día (**Fig. 6**).

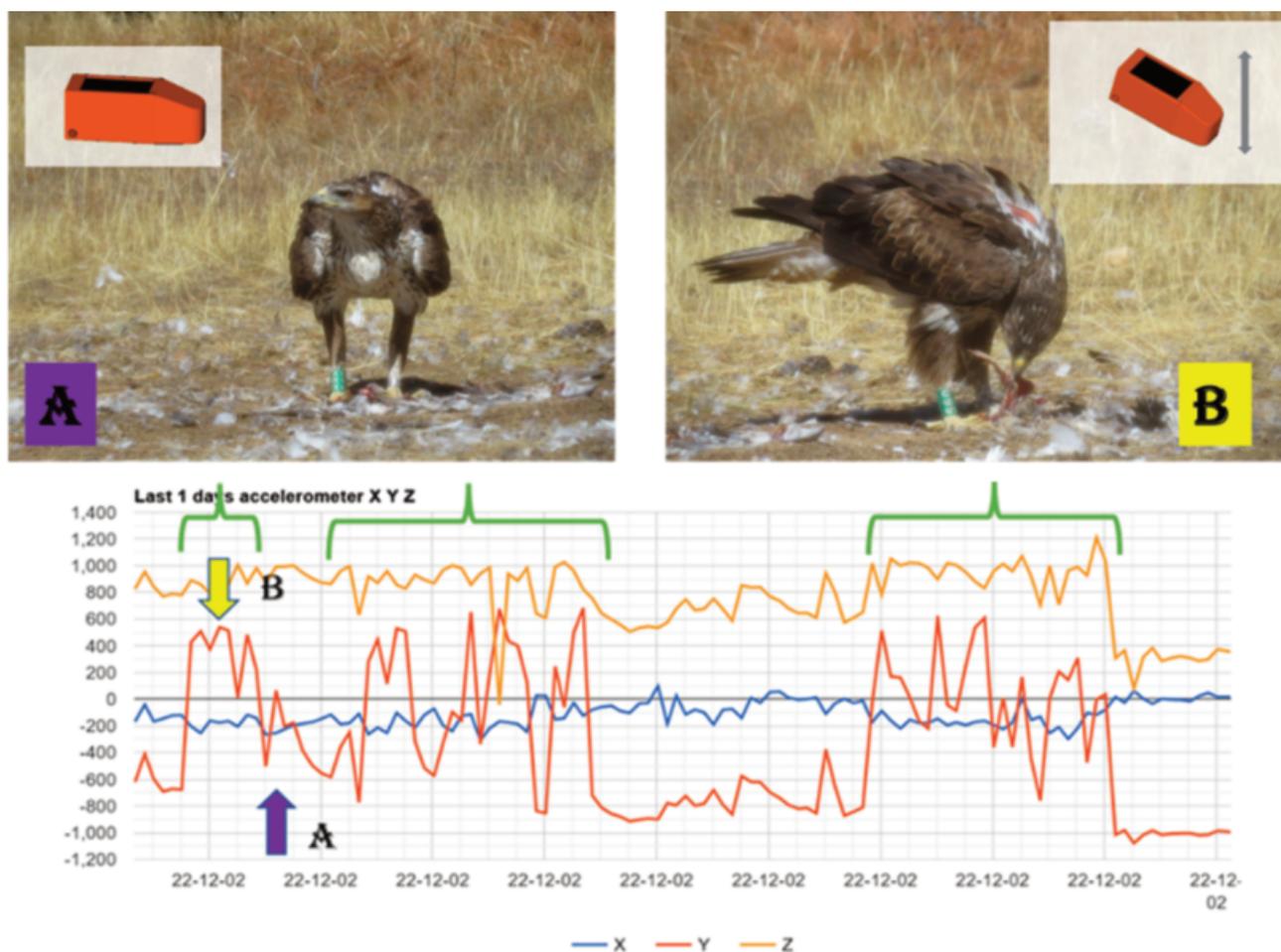


Figura 2. Esquema interpretativo de la alimentación en águila perdicera, con periodo de vigilancia (A) y periodo de ingestión (B) definidos en el eje "y". Los corchetes verdes indican registros de alimentación en un mismo día.

Figure 2. Interpretative scheme of feeding in Bonelli's eagles, with vigilance period (A) and ingestion period (B) defined on the "y" axis. Green brackets indicate feeding records on the same day.

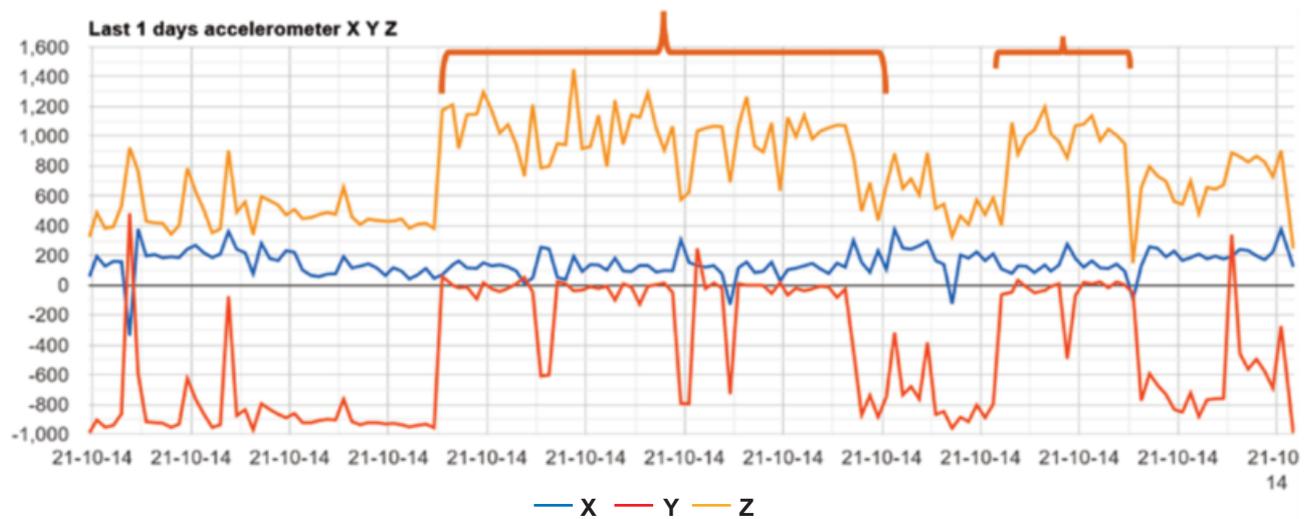


Figura 3. Esquema interpretativo de vuelo dispersivo de águila perdicera. Los corchetes marrones indican los registros de vuelo. Fotografía Alberto Álvarez.

Figure 3. Interpretative scheme of Bonelli's eagle dispersive flight. Brown brackets indicate flight records. Photo: Alberto Álvarez.

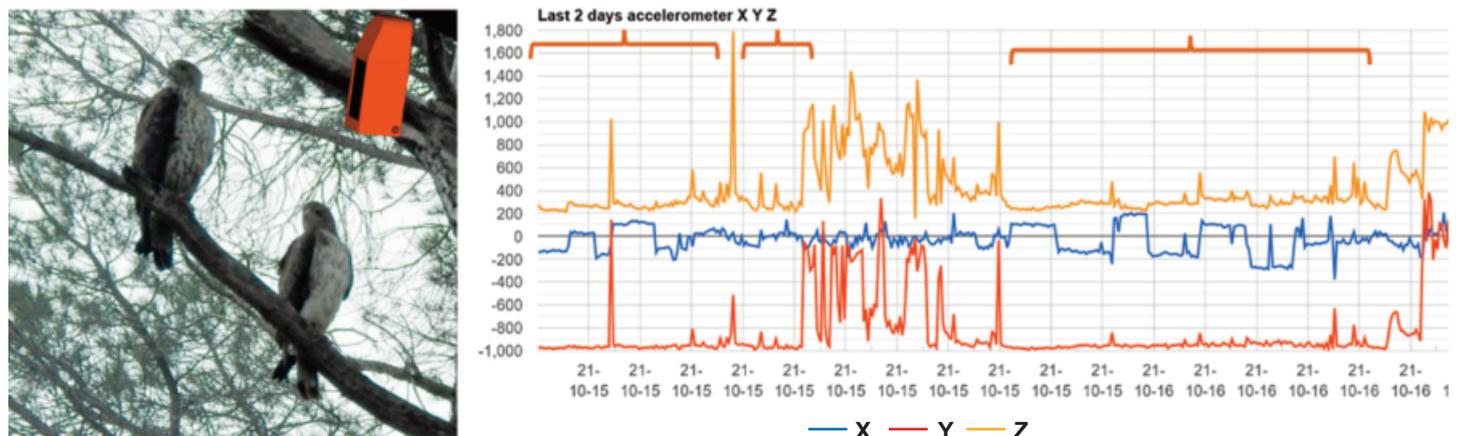


Figura 4. Interpretación de la gráfica de ejes de acelerómetro en posición de descanso. Los corchetes marrones indican los registros de descanso.

Figure 4. Interpretation of the accelerometer axes plot at rest position. Brown brackets indicate resting records.

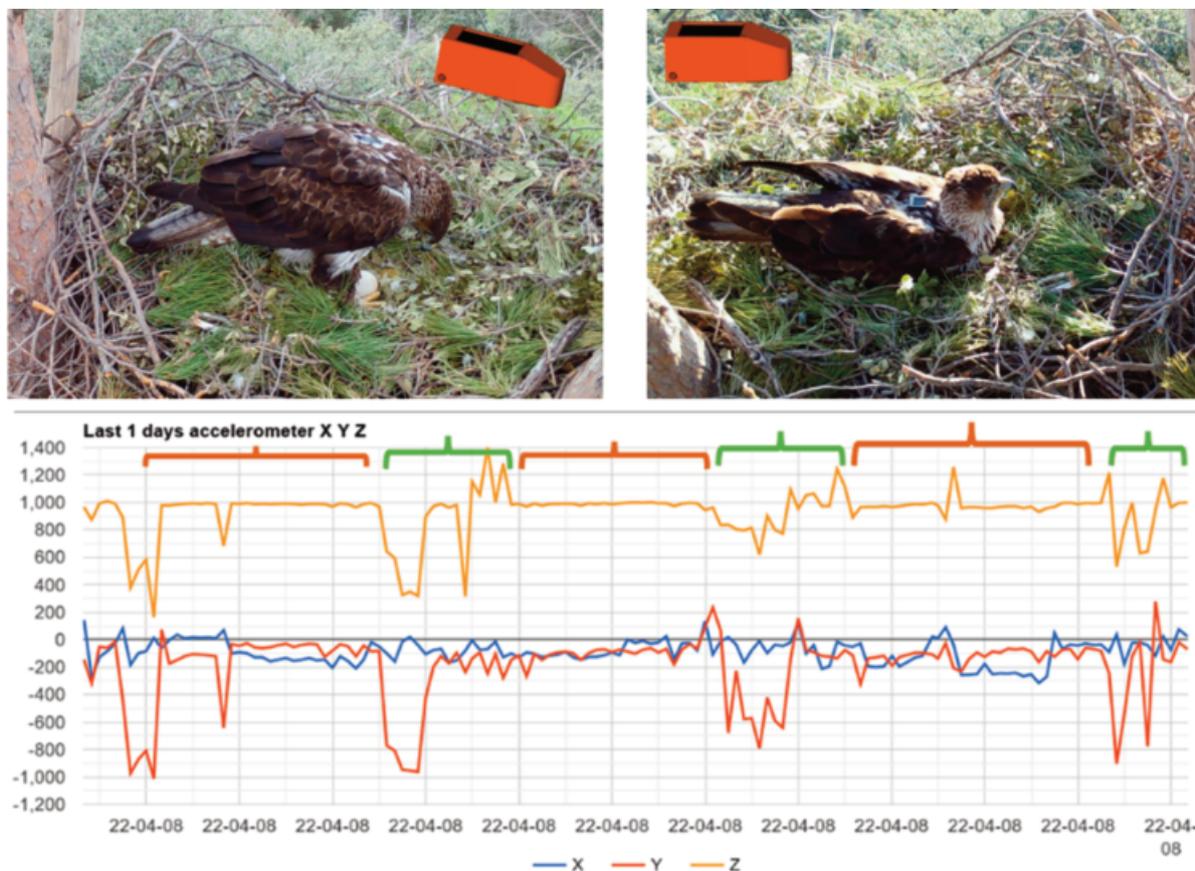


Figura 5. Esquema interpretativo de la fase de incubación. Corchetes verdes de descanso de la incubación y corchetes marrones indican registros de incubación continuada.

Figure 5. Interpretative scheme during incubation. Green Brackets indicate incubation rest and brown brackets indicate continuous incubation records.

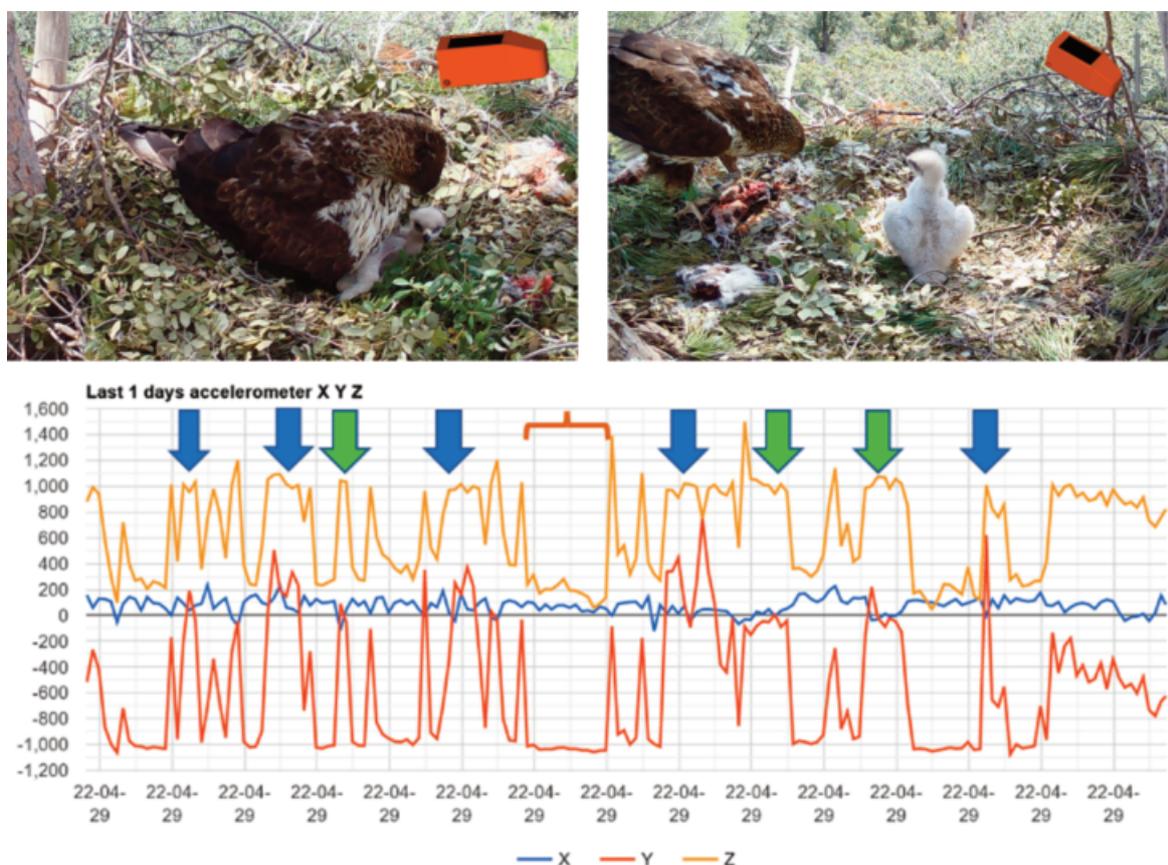


Figura 6. Esquema interpretativo de la fase de cuidado y alimentación de pollos pequeños. Las flechas azules indican las cebas con valores positivos del eje "y", las flechas verdes los periodos en que están tumbados encima de los pollos con valores en torno a cero del eje "y". La acotación marrón indica el periodo de descanso.

Figure 6. Interpretative scheme of chick-rearing phase of hatchlings. The blue arrows indicate the feeding moments, with positive "y" axis values. The green arrows, moments when the parents are lying on the chicks, with "y" axis values around zero. The brown brackets indicate resting period.

Pelea territorial o depredación

Como se ha mostrado anteriormente, en el caso de la alimentación el eje discriminante principalmente es el eje "y", mientras que en el caso de una pelea con otra rapaz de su misma o de otra especie tiene más importancia el eje "z". Se observa en la gráfica volutes del emisor mostrando valores del eje "z" en posiciones negativas, pero según el transcurso de la situación puede tomar valores positivos y negativos alternadamente, según el ejemplar se encuentre por encima de su adversario o por debajo. Estos sucesos que pueden durar horas, en algunas ocasiones acaban en muerte y los valores del acelerómetro se vuelven constantes, o por el contrario consiguen liberarse, volviendo entonces a posiciones naturales. En este caso la gráfica de la temperatura sirve de ayuda para diferenciar este, de otros sucesos con patrones similares, como que el ejemplar esté siendo depredado. En la acotación verde de la **Figura 7** se puede observar como la temperatura se mantiene en rangos similares a otros días si no se llega a producir la muerte. Los momentos en que aparece la gráfica constante es debido a que el emisor se desactiva por la noche.

Animal herido incapaz de volar

En el caso de que un animal se encuentre herido incapaz de volar, pero con capacidad de caminar, el patrón del panel del acelerómetro se hace constante. Se puede observar que los tres ejes

apenas tienen variación ni dientes de sierra que indiquen cambio de actividad. Los ejemplares en esta situación tienen capacidad de realizar grandes desplazamientos, incluso varios kilómetros. La acotación marrón de la **Figura 8** muestra una sucesión de comportamientos habituales diarios, vuelos, alimentación, descanso, sin embargo, la acotación verde muestra un cambio de rutina con mínimos cambios diarios. El eje "x" se mantiene en valores en torno a cero, el eje "y" toma valores muy negativos constantes, lo que indica una posición erguida o semi-erguida cuando camina, y el eje "z" muestra valores positivos medios entre 600 y 800 cm/s². El "track" o camino realizado aportado por las descargas GPS facilita la interpretación de esta situación.

Mortalidad

Cuando los valores de los tres ejes del acelerómetro se quedan constantes sin variación, puede indicar dos cosas, una que el emisor se ha desprendido por sus puntos de sutura o dos que el animal ha muerto. En ocasiones el propio panel de control envía un aviso de falta de actividad o de posición anómala del emisor (eje "z" tomando valores negativos), pero no siempre es así. Algunos cuadros posturales son coincidentes y repetibles entre distintas causas de mortalidad, en otros casos, se producen posiciones más aleatorias como es en el caso de la colisión o el disparo. En todo caso esta información es útil para tener una idea de lo que puede haber sucedido y si nos encontramos ante el escenario de un posible delito.

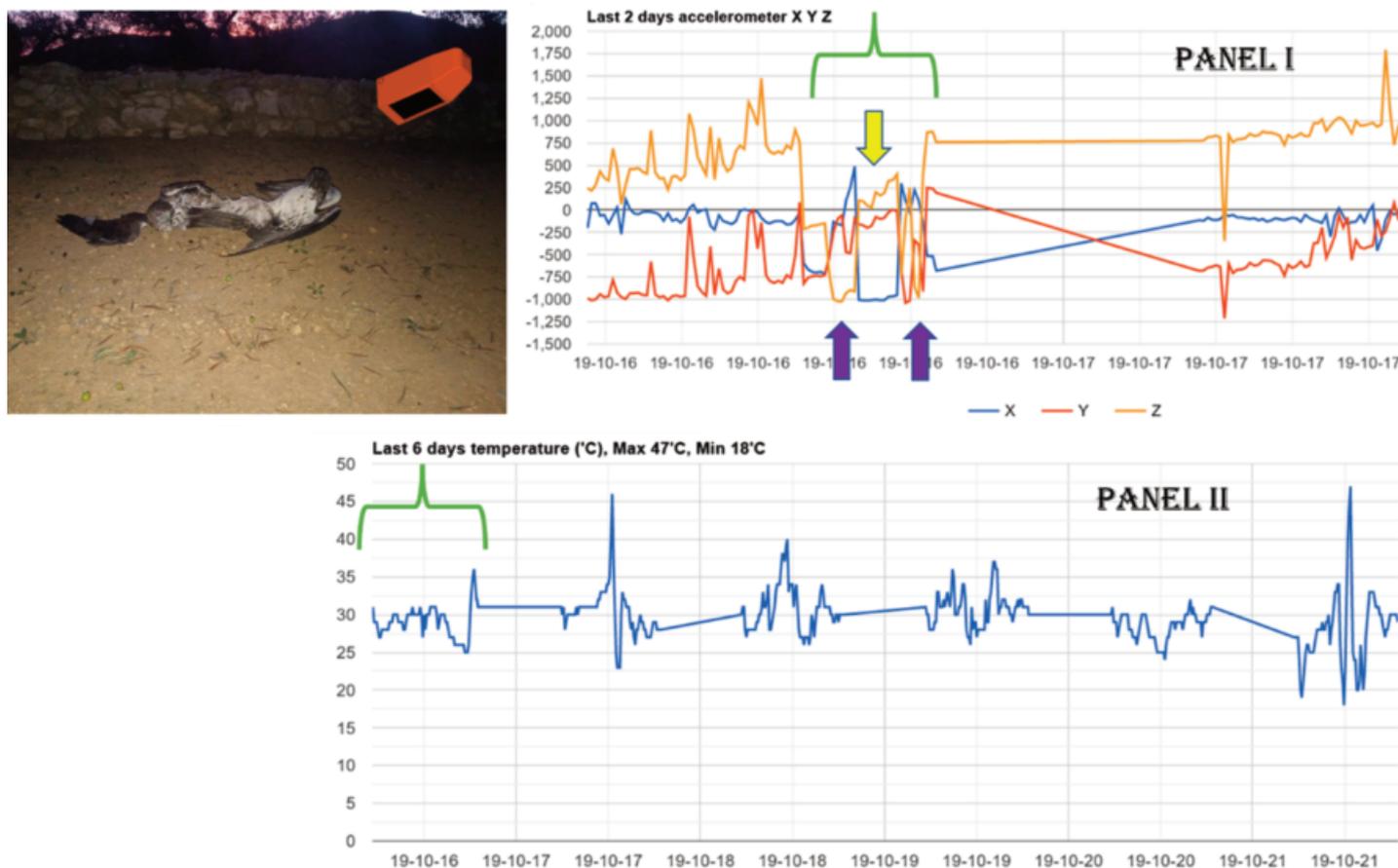


Figura 7. Pelea territorial de un macho de águila perdicera (acotación verde en el panel I del acelerómetro y panel II de la temperatura) que fue liberado tras su ingreso en el Centro de Recuperación de Vallcalent (Lleida). Retornó a su territorio que ya había sido ocupado. Las flechas moradas indican cuando el animal está por debajo de su adversario y la flecha amarilla cuando el animal está por encima. Fotografía y rescate: Claudi Baiges.

Figure 7. Territorial battle of a male Bonelli's eagle (green brackets on accelerometer panel I and temperature panel II) that was released after its admission to Vallcalent wildlife rehabilitation centre (Lleida). It returned to its territory that was already occupied. The purple arrows indicate when the animal is below its adversary, while the yellow arrows when the animal is above. Rescue and photography: Claudi Baiges.

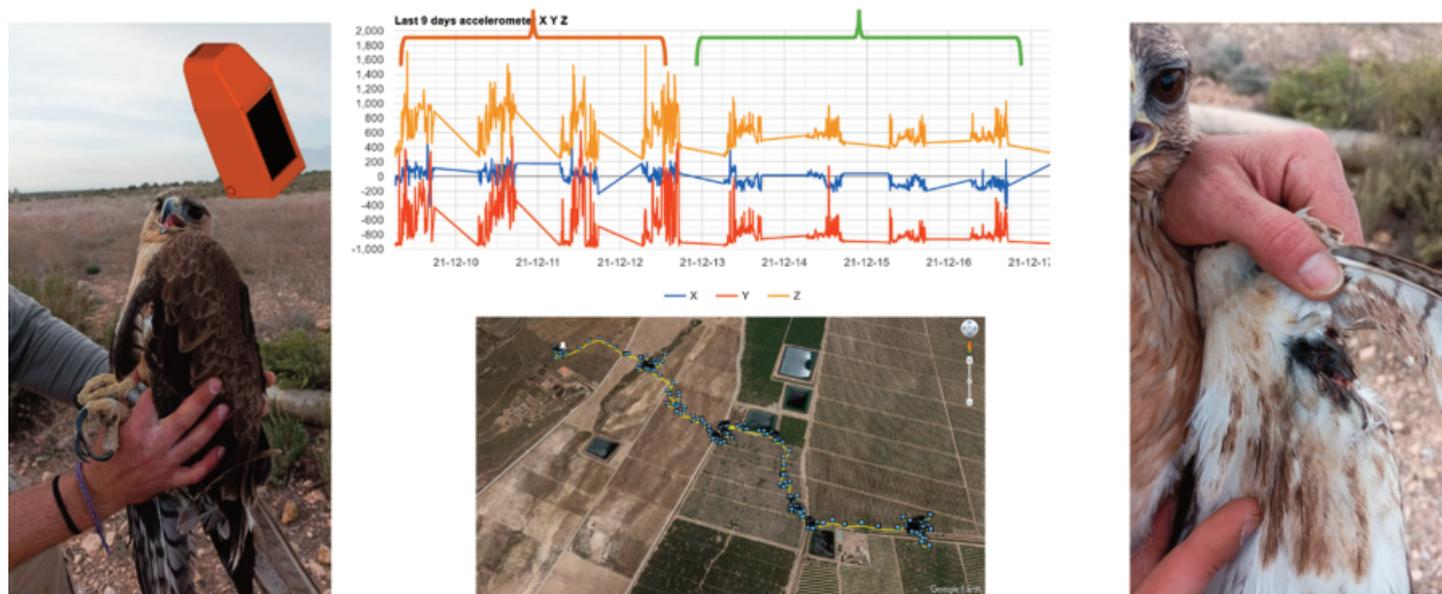


Figura 8. Águila perdicera electrocutada en apoyo eléctrico que sobrevivió a la descarga y durante varios días se desplazó caminando hasta que fue rescatada. Se observa un cambio de los registros normales (corchetes marrones) respecto a cuando el ejemplar se desplaza andando y herido (corchetes verdes). Fotografía y rescate: Mario León Ortega y Alonso Miñano (Agente Medioambiental Región de Murcia).

Figure 8. Electrocutated Bonelli's Eagle in an electrical pylon that survived the discharge and walked for several days until it was rescued. There is a change from normal records (brown brackets) to when the specimen is walking and wounded (green brackets). Rescue and photography: Mario León Ortega and Alonso Miñano (Environmental agent. Región de Murcia).

Electrocución

La posición de los cadáveres tras una electrocución suele ser bastante indicativa de lo que ha sucedido. Las aves cuando se precipitan inertes desde una posición elevada caen normalmente de espaldas al tener mayor peso en la parte posterior del cuerpo, por lo que nos encontramos ante una situación con el eje "z" invertido en valores muy negativos. Sin embargo, en determinadas ocasiones los animales llegan a cerrar las garras en el momento de la descarga por lo que se quedan asidos en el conductor o al apoyo eléctrico. En este caso, el eje "x" se encuentra un poco desviado del cero según sea la extremidad que ha quedado sujeta, el eje "y" toma valores muy positivos, al estar el animal bocabajo y el eje "z" toma valores cercanos a cero al estar el emisor perpendicular al suelo. En este segundo caso podemos encontrar ligeras fluctuaciones en el registro del acelerómetro debido al movimiento producido por el viento. En la **Figura 9** se puede observar el primer caso (A) y el segundo (B).

Envenenamiento, intoxicación o inanición

Cuando las aves mueren envenenadas o intoxicadas suelen hacerlo en posición bocabajo y con las alas abiertas o parcialmente abiertas. Esta posición ocurre también en muertes por emaciación o desnutrición. Por ello, el cuadro postural que muestra el acelerómetro puede ser similar en todos estos casos. En la intoxicación o el envenenamiento pueden producirse cuadros convulsivos previos a la muerte que pueden facilitar la identificación de la causa con el acelerómetro. Por lo tanto, el eje "x" puede mantenerse en torno a cero o girado según la posición en la hora de la muerte, el eje "y" se encuentra en torno a cero, a no ser que se haya producido un cuadro espasmódico que haya dejado el cadáver rígido y, por último, el eje "z" toma valores positivos altos (**Fig. 10**).

Discusión

El acelerómetro se ha mostrado como una herramienta muy útil para interpretar los patrones etológicos de los animales, estudiando desde modelos de vuelo a estimas de supervivencia (**Halsey et al. 2009; Arrondo et al. 2020; García-Jiménez et al. 2020**). En este estudio hemos buscado una manera eficiente de interpretar los com-

portamientos de forma rápida y visual, con la exigencia mínima a los emisores con el objetivo de mantener las baterías a un nivel alto para alargar su vida útil (**Ventosa y Schuhmann 2015**). El método de marcaje, torácico tipo Garcelon, se ha mostrado esencial para dos aspectos relacionados con el acelerómetro. Primero, una posición del dispositivo elevada en la espalda facilita la recolección de mayor variedad de comportamientos debido a que el movimiento que se produce en esta área en los cambios de actividad es más patente que en otros tipos de marcaje como por ejemplo el pélvico, donde los cambios de postura son menos acusados al estar instalado en la zona del obispillo (**Naef-Daenzer 2007; Mallory y Gilbert 2008; Duriez 2020**). Segundo, en la parte alta de la espalda la insolación es mayor por lo que la recarga por parte de su panel solar es más eficaz que en la parte inferior de la espalda que habitualmente se encuentra tapada por las plumas de las alas. Una recarga mayor proporciona un número de registros constante sin pérdida de información por descarga de la batería.

El estudio con aves cautivas monitorizadas ha sido una buena aproximación al tratarse de situaciones controladas donde se pueden observar comportamientos al completo y comparar con un número mayor de datos de acelerometría, algo que ha facilitado la interpretación posterior en el medio silvestre. El alto grado de clasificación correcta por el análisis discriminante, cerca del 70%, incrementa la fiabilidad de las interpretaciones comportamentales a partir de los registros de los ejes que ofrece el acelerómetro. Los comportamientos que mejor se discriminan fueron la alimentación y el descanso. Sin embargo, otros comportamientos presentan gran cantidad de error, como por ejemplo el desplazamiento. Las razones posibles para esta incertidumbre podría ser la combinación de varios comportamientos en uno, como caminar y volar, o por otro lado que se vean influenciados por las limitaciones de espacio en cautividad. Por lo que estos estudios podrían ser muy útiles para registrar unos comportamientos, pero no tanto para otros. Tras el experimento desarrollado en cautividad aparece que el eje que mayor número de comportamientos discrimina es el eje "y". Valores altos de este eje indican momentos en que las águilas se están alimentando al balancearse el emisor desde una posición erguida hacia adelante, valores mínimos en negativo indican descanso. En el caso del vuelo la posición del emisor es plana. Los otros ejes son importantes para obtener información adicional relevante,

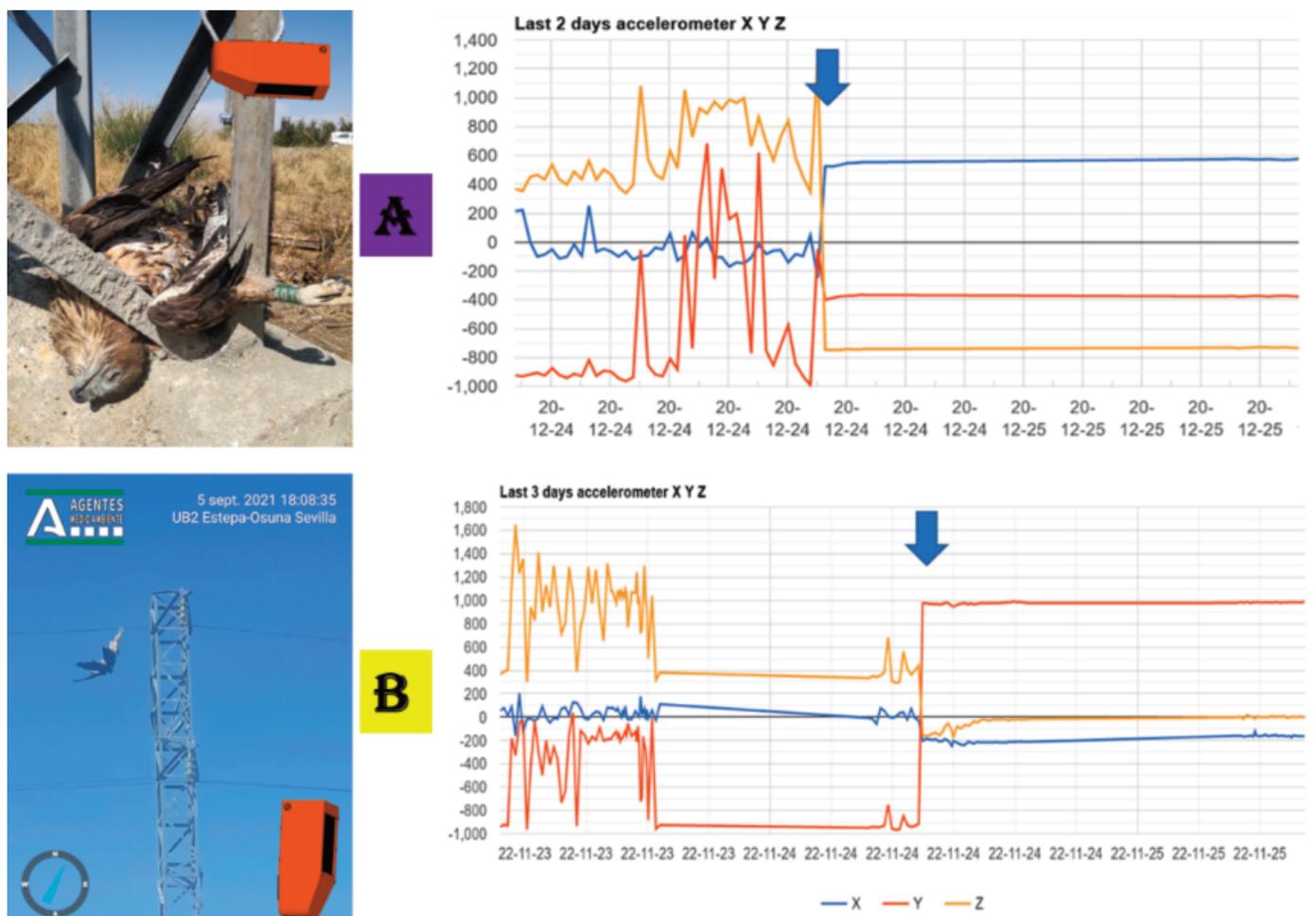


Figura 9. Esquema interpretativo de las dos situaciones de electrocución más frecuentes. La flecha azul indica el momento de la muerte. Caso A: El ejemplar se precipita desde el apoyo al suelo y por gravedad generalmente cae de espaldas por lo que el “z” toma valores negativos ($n = 16$). Caso B: El ejemplar por la descarga contrae las garras y queda enganchado por lo que queda colgando con la cabeza hacia abajo, ejes “x” e “z” toman valores en torno a cero, “y” toma valores máximos ($n = 2$).

Figure 9. Interpretative scheme of the two most frequent electrocution situations. The blue arrow indicates the time of death. Case A: The subject falls from the support to the ground and due to gravity generally falls on its back, so the “z” takes negative values ($n = 16$). Case B: Due to the discharge, the subject contracts its claws and remains grasped, hanging with its head downwards, the “x” and “z” axes take values around zero and “y” takes maximum values ($n = 2$).

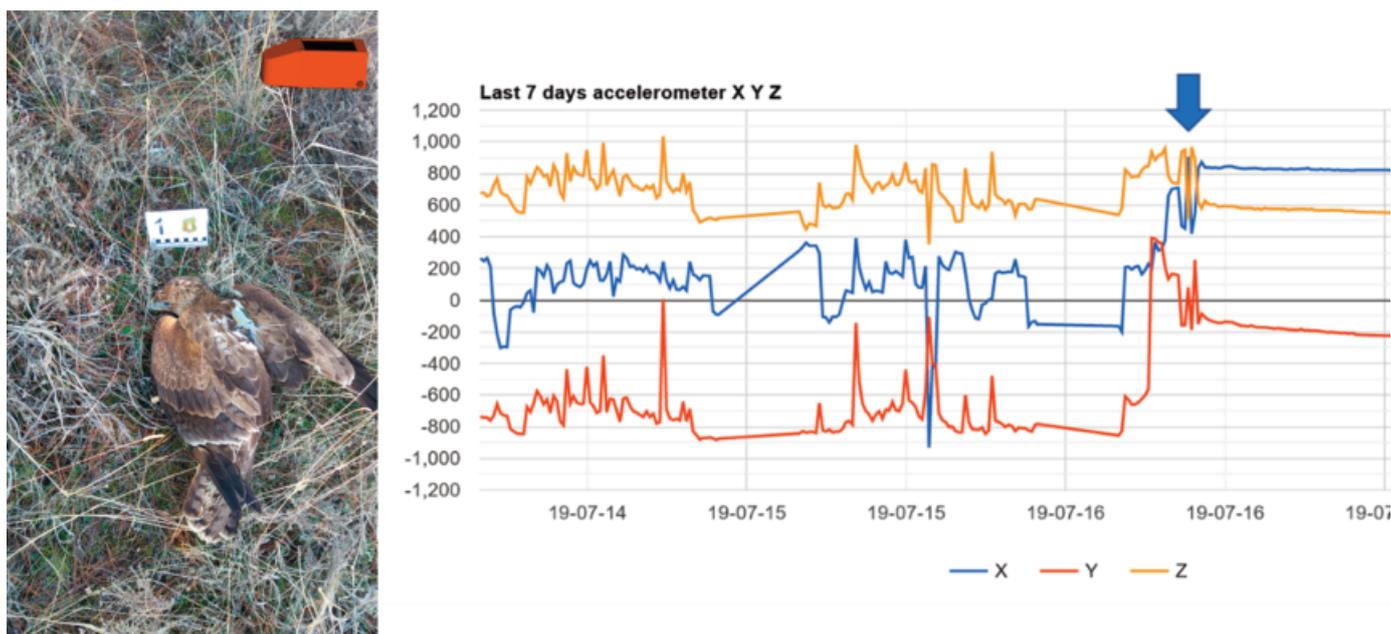


Figura 10. Esquema interpretativo del cuadro postural tras la muerte producido por intoxicación, envenenamiento o inanición ($n = 5$). La flecha azul indica las convulsiones pre-mortem.

Figure 10. Interpretative scheme of the carcass position produced by intoxication, poisoning or starvation ($n = 5$). Blue arrow indicates pre-mortem convulsions.

como conocer si el emisor está equilibrado en el caso del eje “x” o saber si la posición en la que se encuentra el emisor y con ello el animal es incompatible con un comportamiento natural para lo cual es definitivo el eje “z”.

La alimentación, el vuelo o el descanso son patrones fácilmente interpretables en la naturaleza gracias a las gráficas proporcionadas por el acelerómetro. En otros aspectos vitales como puede ser la reproducción podemos conocer el número de horas que pasa cada progenitor incubando, alimentando a las crías o cuantas cebas se producen por día según el desarrollo de los pollos. También se puede afinar el momento exacto del nacimiento del primer pollo porque el progenitor se levanta mayor número de veces sin llegar a proporcionar cebas. Las primeras cebas usualmente se producen a partir del segundo día de vida ya que en las horas previas el pollito está reabsorbiendo el vitelo del huevo (Holland 2007). En el caso de tener los dos ejemplares parentales equipados con emisor GPS se puede comprobar que la hembra es la que mayores labores realiza en el cuidado y ceba de los pollos, mientras el macho se dedica más a la búsqueda activa de presas (Martínez et al. 2020).

En el caso de los ejemplares en el medio natural gracias a una interpretación rápida del acelerómetro podemos tener margen de acción para rescatar a un ejemplar que se encuentre herido y se desplace por el suelo, o que haya caído en una balsa y se encuentre aún vivo. También podemos conocer si se está debilitando porque cesa la actividad o porque no se ha podido alimentar en los últimos días. Esto es especialmente importante cuando hablamos de especies amenazadas donde cada individuo tiene un valor intangible para la supervivencia de la especie o de la población en concreto. Una correcta gestión de la información proporcionada por los gráficos puede hacer que el animal viva o muera. Este hecho es muy patente en las peleas intraespecíficas de águilas perdiceras, donde ambos animales pueden estar enganchados durante horas incluso de noche corriendo el riesgo de ser depredados por carnívoros terrestres oportunistas (Baiges “comunicación personal”).

Cuando se produce la muerte el cuadro postural aportado por los tres ejes del acelerómetro puede aportar mucha información sobre la causa, pudiendo conocer si han sido depredados, disparados o envenenados (Zorrilla et al. 2015). Gracias al acelerómetro fue posible conocer dónde pudo haber comido previamente el primer buitre negro (*Aegypius monachus*) intoxicado con diclofenaco en Europa y con ello la fuente del medicamento (Herrero-Villar et al. 2021). Importante es remarcar que los movimientos del cuerpo del ejemplar post-mortem también quedan registrados. En el caso de que hayan sido depredados puede conocerse si se trataba de un depredador diurno o nocturno. También quedaría registrado si una escena posible de un delito ha sido alterada. Conocidos son los casos de ejemplares que fueron arrojados a la carretera para simular un atropello después de haber sido abatidos en un coto de caza (autores observación personal). La importancia de este sensor es tal, que se han conseguido condenas penales gracias a los informes periciales realizados tras la muerte de ejemplares derivada de la ingesta de venenos o tras haber sido disparados ilegalmente. Uno de estos casos, es el de un buitre negro liberado en Lleida que fue envenenado en la Comunidad de Madrid junto a varios milanos reales (*Milvus milvus*) y zorros (*Vulpes vulpes*). El acelerómetro puso al equipo de seguimiento sobre aviso de un posible caso de envenenamiento. Esto generó una rápida intervención de la unidad canina de los Agentes Forestales de la región lo que conllevó a la localización de todos los animales envenenados, los cebos y al culpable, que fue condenado con una pena de prisión de 10 meses (GREFA 2021). Otro caso que llevó a condena gracias a la rápida interpretación del acelerómetro fue el de un águila perdicera en Loja (Granada) que fue disparada, tirada a un contenedor de basura y su emisor arrojado en el pantano de Iznájar. La interpretación de los ejes del acelerómetro pudo reconstruir la escena y ante la investigación por parte del SEPRONA de la Guardia Civil y de los Agentes Medioambientales de Andalucía, el culpable se entregó siendo condenado por delito ecológico (GREFA 2022). La jurispru-

dencia en esta materia es muy reducida por lo que cobran mucha importancia estas sentencias y la labor de centinelas ambientales de los ejemplares marcados con emisor GPS. Al igual que en los animales heridos o enfermos, en el caso de los delitos ambientales cabe remarcar la importancia de una alerta temprana que evite la pérdida de pruebas judiciales.

La evolución de los dispositivos en los últimos años ha llevado a la incorporación de cada vez más sensores que nos ayudan a conocer mejor el estado de los ejemplares monitorizados. Este trabajo pretende servir de ayuda para inferir comportamientos o causas de mortalidad a investigadores que utilicen emisores GPS-GSM con acelerómetro de una manera rápida y visual a partir de la experiencia generada con el águila perdicera durante dos proyectos europeos.

Contribución de los autores

Juan José Iglesias-Lebrija: Conceptualización, Metodología, Redacción – Revisión y edición. Marta García: Investigación, Análisis formal. José Manuel Serrano: Supervisión, Curaduría de datos, Redacción – Revisión y edición. Ernesto Álvarez: Investigación, Recursos y redacción – borrador original. Sergio de la Fuente: Investigación, Recursos y redacción – borrador original. Miguel Marco: Investigación, Recursos y redacción – borrador original. Manuel Galán: Investigación, Recursos y redacción – borrador original. Virginia Moraleda Redacción – Revisión y edición.

Agradecimientos

Este artículo no hubiera sido posible sin la colaboración de entidades o administraciones como la Asociación Española de Ecología Terrestre o el Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico a través de sus fondos de Utilidad Pública. El proyecto AQUILA a-LIFE (LIFE 16/NAT/ES/000235) ha permitido el marcaje de las águilas perdiceras para este estudio. Sin lugar a dudas muchas personas han aportado mucho en este trabajo como han sido: Rafael Hernández, Pablo Izquierdo, Nacho Otero, Jorge Aguado, Jesús Bautista, Claudi Baiges, Toni Borau, Alberto Álvarez, José Rafael Garrido, Íñigo Fajardo, Mario León, Alonso Miñano, Diego García, José Joaquín Aniceto, Enrique Ávila, Alberto Galdón, Elisabetta Ragarella, Eneko Arrondo, Juan Manuel Pérez García, Víctor García, Andreia Dias, Juan Pablo Díaz, Jorge Ibañez y Ana Pisa. Agradecemos la mejora sustancial del manuscrito a dos revisores anónimos y a los editores de la revista.

Referencias

- Arrondo, E., Sanz-Aguilar, A., Pérez-García, J.M., Cortés-Avizanda, A., Sánchez-Zapata, J.A., Donazar, J.A. 2020. Landscape anthropization shapes the survival of a top avian scavenger. *Biodiversity and Conservation* 29: 1411-1425.
- Bridge, E.S., Thorup, K., Bowlin, M.S., Chilson, P.B., Diehl, R.H., Fléron, R.W., Hartl, P., et al. 2011. Technology on the move: recent and forthcoming innovations for tracking migratory birds. *BioScience* 61: 689-698.
- Cagnacci, F., Boitani, L., Powell, R.A., Boyce, M.S. 2010. Animal ecology meets GPS-based radiotelemetry: a perfect storm of opportunities and challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 365: 2157-2162.
- Duriez, O. 2021. Leg loop Harness. Design and Method 4. *Vulture News* 78: 37-43.
- Duriez, O. 2020. Leg loop Harness. Design and Method 4. *Vulture News* 78(a):37-43.
- García, V., Iglesias-Lebrija, J.J., Moreno-Opo, R. 2021. Null effects of the Barcelona harnessing method and transmitter type on soaring raptors. *Ibis* 163: 899-912.
- García-Jiménez, R., Martínez-González, J.M., Oliva-Vidal, P., Piqué, J., Sesé, J.A., Margalida, A. 2020. Nocturnal flights by Bearded Vultures *Gypaetus barbatus* detected for the first-time using GPS and accelerometer data. *Bird study* 67(1), 135-141.

- GREFA 2021. El envenenamiento de fauna más grave en la Comunidad de Madrid se salda con una sentencia condenatoria. [Consultado 20 noviembre de 2022]. Disponible en: <https://www.grefa.org/noticias/94-notas-de-prensa/3779-nota-de-prensa-el-envenenamiento-de-fauna-m%C3%A1s-grave-en-la-comunidad-de-madrid-se-salda-con-una-sentencia-condenatoria.html>.
- GREFA 2022. N.P. Sentencia condenatoria por abatir a un águila de Bonelli seguida por GREFA para el proyecto europeo AQUILA a-LIFE. [Consultado 20 noviembre de 2022]. Disponible en: <https://www.grefa.org/noticias/94-notas-de-prensa/3941-nota-de-prensa-sentencia-condenatoria-por-abatir-a-un-%C3%A1guila-de-bonelli-seguida-por-grefa-para-el-proyecto-europeo-aquila-a-life.html>
- Halsey, L.G., Portugal, S.J., Smith, Jennifer.A., Murn, C.P., Wilson, R.P. 2009. Recording raptor behavior on the wing via accelerometry. *Journal of Field Ornithology* 80: 171-177.
- Herrero-Villar, M., Delepouille, É., Suárez-Regalado, L., Solano-Manrique, C., Juan-Sallés, C., Iglesias-Lebrija, J.J., Camarero, P.R., et al. 2021. First diclofenac intoxication in a wild avian scavenger in Europe. *Science of The Total Environment* 782: 146890.
- Holland, G. 2007. *Encyclopedia of aviculture*. Hancock House. Columbia Británica, Canada.
- InfoStat. 2008. *InfoStat, versión 2008. Manual del Usuario*. Grupo InfoStat FCA, Universidad Nacional de Córdoba. Primera Edición, Editorial Brujas, Córdoba, Argentina.
- Izquierdo, P., García, R. 2018. Cría en cautividad LIFE Bonelli. En: Equipo LIFE Bonelli (eds.). *Recuperación Integral de las poblaciones de águila de Bonelli en España. Seminario Internacional (Sangüesa-Navarra. Septiembre 2017)*, pp. 27-38. LIFE Bonelli. Pamplona, España.
- Kenward, R.E. 2000. *A manual for wildlife radio tagging*. Academic press. Londres, Reino Unido.
- Lass, L., Callihan, R. 1993. GPS and GIS for Weed Surveys and Management. *Weed Technology* 7(1): 249-254.
- Li, T., Zhu, S., Ogihara, M. 2006. Using discriminant analysis for multi-class classification: an experimental investigation. *Knowledge and information systems* 10: 453-472.
- Mallory, M.L., Gilbert, C.D. 2008. Leg-loop harness design for attaching external transmitters to seabirds. *Marine Ornithology* 36: 183-188.
- Martínez, J.E., Zuberogoitia, I., Escarabajal, J.M., Cerezo, E., Calvo, J.F., Margalida, A. 2020. Breeding behaviour and time-activity budgets of Bonelli's Eagles *Aquila fasciata*: marked sexual differences in parental activities. *Bird Study* 67: 35-44.
- Meyburg, B.-U., Fuller, M.R. 2007. Spatial tracking; B. Satellite tracking. pp. 242-248 in D.M. Bird and K.L. Bildstein. eds. *Raptor Research and Management Techniques. 2nd ed.* Hancock House Publishers. Ltd. Surrey, B.C., Canada and Blaine, Washington. Estados Unidos.
- Naef-Daenzer, B. 2007. An allometric function to fit leg-loop harnesses to terrestrial birds. *Journal of Avian Biology* 38: 404-407.
- Seegar, W.S., Cutchis, P.N., Fuller, M.R., Suter, J.J., Bhatnagar, V., Wall, J.G. 1996. Fifteen Years of Satellite Tracking Development and Application to Wildlife Research and Conservation. *Johns Hopkins Apl Technical Digest* 17: 11.
- Strikwerda, T.E., Fuller, M.R., Seegar, W.S., Howey, P.W., Black, H.D. 1986. Bird-borne satellite transmitter and location program. *Johns Hopkins APL Technical Digest* 7: 6.
- Tomkiewicz, S.M., Fuller, M.R., Kie, J.G., Bates, K.K. 2010. Global positioning system and associated technologies in animal behaviour and ecological research. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 365: 2163-2176.
- Ventosa, E., Schuhmann, W. 2015. Scanning electrochemical microscopy of Li-ion batteries. *Physical Chemistry Chemical Physics* 17(43):28441-28450.
- Wilson, R., Shepard, E., Liebsch, N. 2008. Prying into the intimate details of animal lives: use of a daily diary on animals. *Endangered Species Research* 4: 123-137.
- Yoda, K., Naito, Y., Sato, K., Takahashi, A., Nishikawa, J., Ropert-Coudert, Y., Kurita, M., et al. 2001. A new technique for monitoring the behaviour of free-ranging Adelie penguins. *Journal of Experimental Biology* 204: 685-690.
- Yoda, K., Sato, K., Niizuma, Y., Kurita, M., Bost, C., Le Maho, Y., Naito, Y. 1999. Precise monitoring of porpoising behaviour of Adelie penguins determined using acceleration data loggers. *Journal of Experimental Biology* 202: 3121-3126.
- Zorrilla, I., García, J., Ruiz, A., Valero, A., Richards, N. 2015. ¿Sabemos detectar bien el veneno en España? *Quercus* 357: 86-90.

Apéndice / Appendix

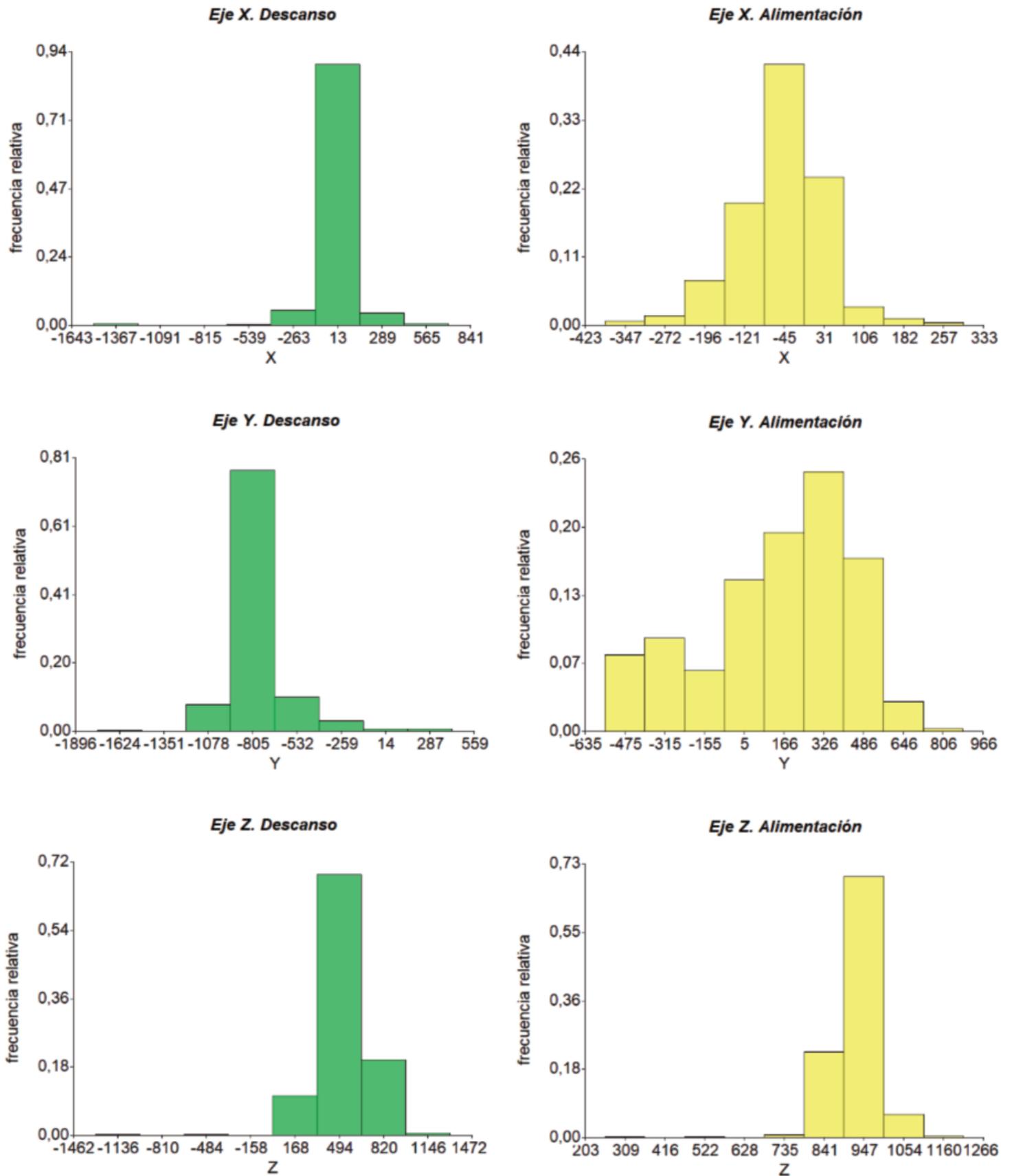


Figura A1. Frecuencia de valores de los ejes "x", "y" y "z" en las actividades de descanso y alimentación.

Figure A1. Frequency of "x", "y" and "z" axes values of the axes for resting and feeding activities.