

Ingeniería aplicada en la biología comportamental: AntVRecord y AntTracker. Innovadora forma de estudiar los ritmos de locomoción y forrajeo de hormigas

Autores: Sabattini, Julián Alberto*

Contacto: *julian.sabattini@uner.edu.ar

País: Argentina

Resumen

Los insectos sociales son relevantes en diferentes ecosistemas del mundo, un caso particular son las hormigas cortadoras de hojas (HCH) porque cortan vegetales que en ambientes antrópicos la consideran como una plaga destructiva. Toda la región centro-sur de Sudamérica está afectado por estos insectos tanto en ecosistemas naturales como en los antrópicos, reduciendo la productividad de ciertos cultivos intensivos y extensivos. Para ello se implementa un sistema de monitoreo para evaluar si es conveniente controlar o no las poblaciones. En este sentido, los sistemas de monitoreo actuales tienden a aumentar la eficiencia, disminuir los costos de control y reducir el impacto ambiental de las sucesivas aplicaciones de insecticidas. Si bien se conocen muchos aspectos biológicos y ecológicos de las HCH, pero son escasos los estudios sobre el comportamiento diario y anual que pueden aportar elementos claves para el manejo adecuado y sostenible. La falta de herramientas tecnológicas para evaluar estos vacíos de información fue el motivo de aplicar desarrollo innovativo basado en fundamentos ingenieriles con el objetivo de comprender y evaluar cuáles son los ritmos de locomoción y forrajero de las HCH a campo estableciendo posibles causales en la heterogeneidad diaria, estacional y anual. Para ello se planteó un esquema de trabajo en el cual una fase de la medición es a campo y otra de procesamiento en gabinete. El AntVRecord es un desarrollo electrónico novedoso, en el cual se utilizaron componentes electrónicos disponibles en el mercado de fácil programación. Captura videos y los almacena en un soporte físico que luego es analizado por diferentes algoritmos que permiten arrojar determinadas variables de interés. Eso se materializó en el AntTracker, un software de fácil utilización que procesa los videos de forma autónoma, cuyo resultado permite caracterizar cualitativa y cuantitativamente la actividad locomotora y forrajera en el tiempo.

1. Introducción

Las hormigas cortadoras de hojas (HCH, en adelante) son conocidas por: a) la actividad de cortar diversos fragmentos vegetales siendo plagas destructivas en la región neotropical (Cherret 1982), b) la capacidad de cultivar hongos logrando una relación de mutualismo muy fuerte (Hölldobler y Wilson 1990), y c) cumplir un rol importante denominándose 'ingenieras de los ecosistemas' dado que modifican la estructura y función de los mismos (Jones et al. 1994, Leal et al. 2014). Este comportamiento como ingenieros del ecosistema ha provocado la colonización en un amplio rango de nichos de alimentación en diferentes tipos de suelo y vegetación (Corrêa et al. 2010, Hölldobler y Wilson 1990) estando presentes en casi todos los ambientes terrestres desde el ecuador hasta latitudes de 50° (Bolton 1994). Su alta diversidad local y amplia distribución reflejan su tendencia evolutiva a ocupar una gran variedad de hábitats, definiendo la estructura de las comunidades vegetales en numerosos ecosistemas.

El forrajeo es la actividad principal que realizan las HCH para cultivar el hongo, utilizado posteriormente como alimento principal de las larvas (Webber, 1972). *Atta* y *Acromyrmex* obtienen su alimento desde

distancias pequeñas hasta grandes debido al tamaño de las obreras y en consecuencia al tamaño del nido, cuanto más grande, mayor distancia abarcan. Durante el proceso de forrajeo puede existir una división de tareas para maximizar la eficiencia y disminuir el desgaste de las hormigas (Roces y Lighton, 1995; Röschard y Roces, 2003). En este sentido se requiere de una secuencia ordenada de pasos para realizar el corte del vegetal, comenzando por la identificación de la fuente de alimento, el corte del material y su posterior transporte al nido. Las HCH son consideradas herbívoros polípagos capaces de utilizar entre el 50% y el 80% de las especies de plantas disponibles provenientes de diversas comunidades vegetales (Wirth et al., 2003). Sin embargo, presentan una selectividad al corte muy marcado basado en características físicas y químicas de las plantas, mostrando una marcada preferencia por ciertas especies de plantas, o en plantas dentro de una especie, hasta incluso hojas dentro de una misma planta (Meyer et al., 2006). Existen numerosos factores bióticos y abióticos que pueden afectar el comportamiento forrajeo. Dentro de los bióticos se pueden observar la abundancia de obreras y el tamaño de la colonia (Hölldobler y Wilson, 1990), así como el estado reproductivo y los requerimientos nutricionales. En tanto los abióticos se relacionan fundamentalmente con la temperatura del aire y suelo, acompañada por la humedad relativa del ambiente, la intensidad de la luz y la presión atmosférica, entre otros. Recientemente se estudiaron los ritmos de actividad de HCH basados en factores endógenos como el fotoperíodo y el ciclo térmico anual (Katzenstein 2021).

En pastizales neotropicales, los géneros *Atta* y *Acromyrmex* tienen el potencial de forrajear una cantidad considerable de gramíneas, reduciendo considerablemente la capacidad de carga (Robinson y Fowler 1982). Estudios realizados en Colombia indican que la instalación de pasturas artificiales se ven perjudicadas gravemente. Sumado a esto, las cámaras huecas de los nidos abandonados presentan un peligro físico a los animales o maquinarias que transitan. Investigaciones en Sudamérica afirman que las HCH forrajean el 15% anual de la vegetación de un bosque tropical (Wirth et al. 2003) y alrededor del 50% de ellas son especies herbáceas (Vasconcelos y Fowler 1990). Esta herbivoría reduce la capacidad reproductiva de las especies, generando espacios sin vegetación en los bosques, promoviendo la entrada de luz, y modificando la estructura y adaptación de las especies presentes (Correa et al. 2010). En líneas generales, un nido puede cortar, cargar y procesar entre 22 y 940 kg de material vegetal anual en forma de millones de pedacitos de hojas y flores (Herz et al. 2007). Esta cantidad puede representar el 2,5% de la vegetación a nivel de paisaje, 12,5 a 15% teniendo en cuenta el área de forrajeo de un nido (Wirth et al. 2003, Sabattini & Bollazzi, 2023), o una reducción de 18% en la cobertura del dosel arbóreo. Todas las estimaciones mencionadas surgen de evaluaciones discretas a lo largo del tiempo y registrado en breves tiempos durante el día, raramente las 24 hs. Esto se debe al esfuerzo humano necesario y a la inexistencia de un soporte electrónico que registre los ritmos de forrajeo durante un período de tiempo considerable en cada estación del año de forma continua.

No solo cortan grandes cantidades de vegetación en ecosistemas naturales, sino también los ecosistemas antrópicos son afectados, causando daños económicos importantes en los cultivos forestales (ejm. *Pinus* spp., *Eucalyptus* spp.), agrícolas (ejm. *Citrus* spp., *Theobroma cacao*, *Manihot esculenta*, *Coffea arabica*, *Zea mays*, *Gossypium hirsutum*) y en los pastizales naturales o pasturas implantadas donde se desarrolla la ganadería extensiva (Zanetti 2007). En particular, las plantaciones forestales son afectadas por numerosos insectos ocasionando severos daños en su crecimiento, pero las HCH de los géneros *Atta* y *Acromyrmex* provocan daños irreversibles sobre los árboles (Zanetti et al. 2014). En este sentido se han realizado numerosas investigaciones donde se demuestra los daños sobre el establecimiento y el desarrollo de los árboles en plantaciones de pinos y de eucaliptos de Sudamérica (Zanetti et al. 2014, Zanuncio et al. 2016). Las especies de del género *Atta* que cortan hojas de *Eucalyptus* spp. (Myrtaceae) en Brasil incluyen *A. laevigata*, *A. sexdens*

-incluyendo tres subespecies- y *A. cephalotes*. Una sola colonia de hormigas cortadoras de hojas por hectárea de bosque puede reducir el crecimiento anual de árboles en un 5% en *Eucalyptus* y en un 10% en *Pinus*, representando una pérdida del 2,1% en la producción anual de madera). Estudios realizados en Brasil han demostrado que los árboles atacados por HCH reducen su altura un 32% y un 25% en el diámetro, provocando severas pérdidas en la producción de madera (Della Lucia 2003). Es importante mencionar que, sumado a las pérdidas de producción en términos de biomasa, se adiciona el incremento en los costos asociados al monitoreo permanente y control.

En este sentido, la importancia que tienen las tareas de monitoreo dentro de la empresa forestal es elemental, en vísperas de implementar un Manejo Integrado de Plagas, en particular de HCH. Algunas empresas del sector forestal adoptan sistemas de monitoreo de HCH, con el objetivo de aumentar la eficiencia, disminuir los costos de control, y reducir el impacto ambiental de las sucesivas aplicaciones de insecticidas. El monitoreo permite estimar el número y el tamaño de los nidos por hectárea, así como las especies de HCH presentes. Estos parámetros mencionados anteriormente ayudan a tomar decisiones, como por ejemplo aspectos económicos de la plantación en relación al costo-beneficio del control de esta plaga determinado por el nivel de daño económico. Es importante tener en cuenta que las empresas forestales deben convivir con un determinado nivel de daño de hormigas, dado que el manejo de plagas consiste en disminuir la población de insectos sin buscar erradicarla (Sabattini 2019).

Actualmente el monitoreo se basa en: conocer cómo se distribuyen los nidos en una plantación, estimar cuál es la abundancia y el tamaño de las colonias, y determinar cuáles son las especies de HCH presentes. Esta información resulta útil en comparación con las prácticas tradicionales de recorrida esporádicas por la forestación, y como resultado de ello, no sólo dan respuesta inmediata para el control, sino que proporcionan información sobre cuáles son los efectos en especies cultivadas y nativas, permitiendo conocer la dinámica poblacional. Sin embargo, aún se desconoce cuál es el momento óptimo de implementar un sistema de control, debido a que la actividad forrajera se encuentra correlacionada con las condiciones medias de las estaciones durante el año, entre otros factores que hoy en día son motivo de investigaciones. La complejidad de su estimación se asocia a numerosos factores ecológicos y etológicos que se interrelacionan y en consecuencia hay comportamientos particulares. Esta complejidad es extremadamente complicada de registrar con las capacidades sensoriales de los seres humanos, lo cual es indispensable contar un sistema automático o semi-automático que permita registrar y analizar comportamientos.

La estimación sobre el nivel de daño de las colonias a campo es compleja, pero en términos productivos básica para cualquier plan de gestión y manejo. Hasta el momento, las evaluaciones son discretas a lo largo del tiempo, es decir, en breves períodos de tiempo durante el día y raramente durante la noche, se registra la actividad locomotora y forrajera. Esto requiere un esfuerzo humano importante para para capturar a campo la información. Al mismo tiempo, no existe de un soporte electrónico que registre los ritmos de forrajeo durante un período de tiempo considerable en cada estación del año de forma continua. Se han implementado otros sistemas pseudo automáticos utilizando filmadoras tradiciones con un procesamiento posterior en gabinete (Bustamante, y Amarillo-Suárez, 2016), pero las baterías se agotan rápidamente generando información parcial. Sin embargo, recientemente este grupo de investigación ha encontrado una manera eficaz de medir los ritmos de locomoción continuo en el tiempo por medio del AntVRecord (Sabattini et al., 2022). Un dispositivo de bajo costo que almacena videos en un soporte físico que luego es analizado por un software, AntTracker, que permite determinar el ritmo de locomoción y forrajeo diario, mensual o estacional de un nido de HCH (Sabattini et al., 2023).

de los videos con la configuración necesaria. Puede reemplazar el pendrive o reutilizarlo para comenzar nuevamente con el proceso de captura de videos.

FIGURA 2. Diseño del AntVRecord con dos puntos de apoyo utilizando un soporte físico de fabricación



El usuario configura sencillamente por medio de una interfaz gráfica, el período de filmación a través de la duración y número de los videos. Puede hacerse utilizando su smartphone, tableta o notebook por vía Bluetooth, y eventualmente de forma remota si el sitio donde se coloca el AntvRecord tiene conexión de internet (Figura 3). El sistema de alimentación es autónomo, utilizando baterías de gel con recarga durante el día de paneles solares. Por lo tanto, la herramienta tiene que ser suficientemente económica en el uso de la energía. Económicamente es de bajo costo, con materiales disponibles en el mercado de fácil configuración y armado.

FIGURA 3. Ejemplo de una pantalla de configuración realizando una captura de video a campo



El soporte físico consistió en adaptar sistemas embebidos de bajo costo, en particular utilizando placas de desarrollo Raspberry Pi, al problema en estudio. La cámara utilizada se adaptó perfectamente a este sistema presentando los requerimientos necesarios para su análisis posterior que utiliza principios de entrenamiento y/o aprendizaje de hormigas cargadas y descargadas.

En forma acoplada, en gabinete se analizan los videos registrados por un software denominado Ant-Tracker (Sabattini et al., 2023) que posibilita reconocer los ritmos de locomoción de una colonia por medio de algoritmos específicos. El procesamiento involucra técnicas de análisis digital de imágenes y video en la detección y localización de HCH cuadro a cuadro mediante la segmentación de imágenes. Este es un proceso de particionar una imagen digital en regiones u objetos constituyentes. Estas regiones serán píxeles agrupados, con una frontera definida, formando un conjunto conectado al que se nombra o etiqueta de una determinada manera. Para ello se utilizaron diferentes técnicas que permiten diferenciar el fondo por donde transitan las hormigas de ellas mismas, y una vez hecho este proceso, extraer información (Figura 4). Todo este proceso es continuo en el tiempo, sorteando numerosas dificultades, principalmente el nivel de tránsito que tienen y generan regiones vacías aumentando el error de detección.

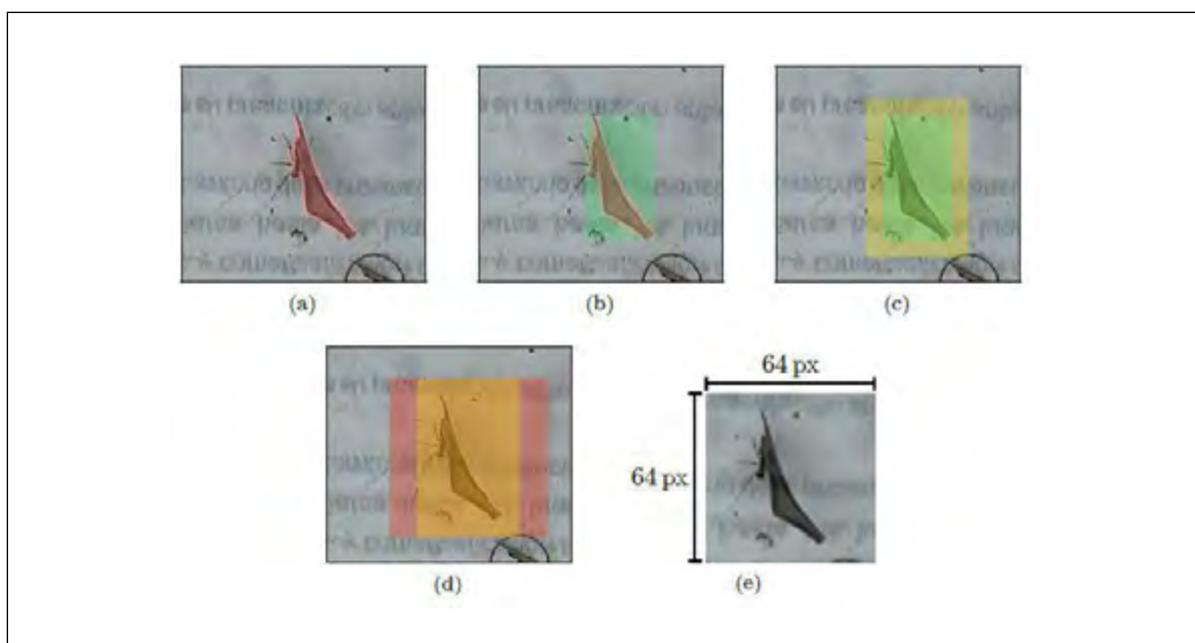
FIGURA 4. Proceso simplificado de extracción del fondo y segmentación de regiones para detectar objetos, en este caso, hormigas en movimiento



Detectar un objeto (o múltiples) en movimiento en un video digital, localizar su ubicación y realizar seguimiento sobre el mismo a lo largo del tiempo se conoce como seguimiento de objetos. Esto es algo complejo en presencia de ruido, como por ejemplo cuando los objetos se detienen temporalmente y luego vuelven a moverse, o cuando transitan espacialmente muy cerca uno de otros, entre otros. El seguimiento de objetos inicialmente debe comenzar con una buena segmentación en el cual es posible obtener una máscara que distingue la localización del objeto bajo análisis en cada cuadro. Si este esquema se aplica para todos los cuadros del video, el recorrido del objeto en el tiempo queda determinado perfectamente. En general, los métodos de reconocimiento de regiones no son ideales, y deben enfrentarse a información faltante, oclusiones o cambios en la escena, dando lugar a la necesidad de las técnicas de seguimiento de objetos. En este caso se utilizó el filtro de Kalman, una clase de algoritmos que proveen predicciones de estados futuros de un sistema, basándose en estimaciones pasadas y observaciones ruidosas. De esta manera se implementó un sistema de seguimiento -también llamado "tracking"- con alta precisión (Figura 5).

Una etapa posterior fue el empleo de redes neuronales convolucionales con aprendizaje múltiples para la detección de hojas. En este caso, y de manera sencilla consiste en enseñar al computador que atributos morfológicos responden a hormigas con hojas y cuales no. Luego de miles de imágenes bajo condiciones diferentes de entrenamiento, el algoritmo cuenta con una base de datos de hormigas cargadas y sin carga, que utiliza para procesar en forma continua con nuevas condiciones de video. Para ello se utilizó la técnica de redes neuronales, en particular de capas convolucionales porque ofrecen una ventaja frente a las capas completamente conectadas: al disminuir la cantidad de pesos a entrenar, aumenta la eficiencia computacional de la red y aumenta su capacidad de generalización agilizando el proceso.

FIGURA 5. Ejemplo del proceso de conversión de una región a una observación.



(a) Se comienza con una región en un cuadro en particular. (b) Se determina el rectángulo que contiene la región. (c) El rectángulo contenedor se expande ligeramente para capturar la totalidad de la hormiga y carga. (d) Un cuadrado que contenga completamente al rectángulo anterior define la sección del cuadro recortada. (e) Finalmente, la sección se escala a 64×64 píxeles.

Como resultado del procesamiento del software es posible determinar número de hormigas con y sin hojas que salen y entran del nido, como así también, la velocidad de locomoción y el tamaño de las mismas. Todo ello es ordenado en bases de datos, para posteriormente realizar el análisis que el investigador requiera.

3. Resultados

El AntVRecord ha superado con éxito las pruebas de campo garantizando un proceso de filmación continua en numerosas ocasiones (Cuadro 1). Actualmente se encuentran funcionando mas de 15 equipos en un ancho longitudinal de 1.500 km (desde Montevideo ROU hasta Mendoza Argentina) registrando la actividad locomotora de hormigas.

CUADRO 1. Pruebas de funcionamiento de AntVRecord en el campo

Prueba	Localidad / Especie de hormiga	AntVRecord ID	Fecha prueba	Duración de videos (horas)	Resolución de video	Duración por videos (archivos)	Requerimientos de almacenamiento
1	1-Protected Natural Area El Caraya (Feliciano, Entre Ríos) <i>Atta voltenweideri</i>	AntVRec_01	2019-06-02	36	640x480	60 min (36 archivos)	20.1 GB (± 558 MB.h ⁻¹)
2	2-Protected Natural Area La Esmeralda (Las Garzas, Entre Ríos) <i>Atta voltenweideri</i>	AntVRec_02	2019-11-09	52	640x480	30 min (104 archivos)	23.4 GB (± 450 MB.h ⁻¹)
3	2- Protected Natural Area La Esmeralda (Las Garzas, Entre Ríos) <i>Atta voltenweideri</i>	AntVRec_02	2020-01-09	15	1280x720	15 min (60 archivos)	15.9 GB (± 1.06 GB.h ⁻¹)
4	3-3° Febrero Field (Las Garzas, Entre Ríos) <i>Atta voltenweideri</i>	AntVRec_02	2020-01-11	25	1280x720	60 min (25 archivos)	29.7 GB (± 1.15 GB.h ⁻¹)
5	2- Protected Natural Area La Esmeralda (Las Garzas, Entre Ríos) <i>Acromyrmex lundii</i>	AntVRec03 y 04	2020-03-30	66.7	640x480	50 min (80 archivos)	19.6 GB (± 290 MB.h ⁻¹)
6	2- Protected Natural Area La Esmeralda (Las Garzas, Entre Ríos) <i>Acromyrmex lundii</i>	AntVRec04 y 05	2020-04-04	94	1280x720	30 min (188 archivos)	55.7 GB (±592 MB.h ⁻¹)
7	4- School of Agronomy National University of Entre Ríos (Oro Verde, Entre Ríos) <i>Acromyrmex lundii</i>	AntVRec06 y 07	2020-11-23	230	640x480	60 min (230 archivos)	76.8 GB (±334 MB.h ⁻¹)
8	4- School of Agronomy National University of Entre Ríos (Oro Verde, Entre Ríos) <i>Acromyrmex lundii</i>	AntVRec07	2021-02-22 to 2021-06-23	854	640x480	60 min (854 archivos)	235.4 GB (±276 MB.h ⁻¹)
9	4- School of Agronomy National University of Entre Ríos (Oro Verde, Entre Ríos) <i>Acromyrmex heyeri</i>	AntVRec08	2021-03-04 to 2021-03-27	550	640x480	60 min (550 archivos)	211.2 GB (±384 MB.h ⁻¹)

Fuente: Tomado de Sabbatini et al. (2022).

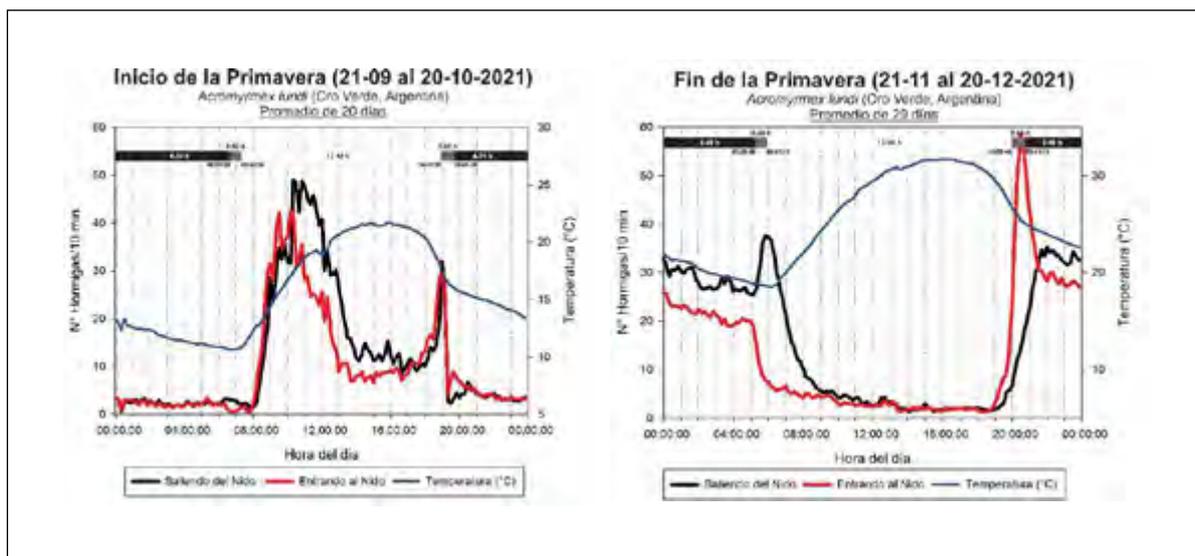
En la localidad de Oro Verde (Argentina) y en Montevideo (ROU) durante el mes de Abril 2021 y Noviembre 2021, respectivamente se iniciaron las grabaciones en nidos de *Acromyrmex lundii* que serán utilizados como testigos tanto para validar y comprobar el funcionamiento del dispositivo (AntVRecord) y el procesamiento del AntTracker; como también para analizar datos preliminares de los patrones de movimiento. En Oro Verde se seleccionaron 3 nidos ubicados en el parque de la Facultad de Ciencias Agropecuarias donde es posible acceder a conexión de internet, posibilitando el control de forma remota. Del mismo modo se realizó en el campus de la Facultad de Agronomía (UdelaR) inicialmente con un nido, y luego con dos más. Los mismos ubicados en regiones en donde quede resguardado de vandalismos, robos o hurtos de los componentes, situaciones que son ajenas al proyecto pero que deben tenerse en cuenta.

Se registró 252 días de grabación en el Nido 1 (abril 2021 a Abril 2022), 85 días en el Nido 2 (Noviembre 2021 a Abril 2022), y 85 días en el Nido 3 (Enero 2022 a Abril 2022). Todos ellos se encuentran en Oro Verde. Se presentaron inconvenientes técnicos relacionados con el sistema de energía, normalizándose a partir de marzo 2022 y también con el sistema de almacenamiento en el cual se reemplazó con discos SSD siendo más estables y con mayor capacidad de grabación. En Montevideo la grabación comenzó en diciembre 2022 luego de una capacitación inicial con el personal de apoyo disponible en el Departamento de Ento-

mología (FA-UdelaR). En total se encuentra almacenado 8,9 TB de videos en las nubes de Google Drive provistos por la FCA- UNER, lo cual resulta muy útil dado que no debe ser almacenados en soportes físicos que pueden presentar errores de escritura o roturas físicas. A partir de mayo 2021 se iniciaron las pruebas de procesamientos con el AntTracker del Nido 1 (Oro Verde) utilizado como testigo de todo el proceso.

Si bien el tiempo de procesamiento es variable, en promedio se requirió de 3 días de procesamiento para analizar un día de grabación, siendo mayor durante los períodos de mayor actividad (otoño- primavera). Estos primeros resultados permitieron obtener las siguientes figuras sobre los ritmos de locomoción estacional del Nido 1 (Figura 5). Aún los resultados son preliminares, y se encuentra en proceso de análisis estadístico de todas las variables obtenidas. El tratamiento de la información demanda un costo informático importante por la cantidad de registros obtenidos, lo cual implica mayor tiempo de análisis. Luego de ello se realizarán interpretaciones biológicas a las salidas, dado que ahora con los escasos datos analizados se imposibilita una discusión acorde de la información.

FIGURA 6. Valores promedios de la actividad diaria al inicio y final de la primavera 2021 para *Acromyrmex lundii* en la provincia de Entre Ríos



Referencias bibliográficas

- Bolton, B. (1994). *Identification guide to the ant genera of the world*. Harvard University Press.
- Cherrett, J. M. (1982). *The economic importance of leafcutting ants*. En Breed, M. D., Michener, C. D. y Evans, H. E. (comps.), *The Biology of social insects: Proceedings, Ninth Congress, International Union for the Study of Social Insects* (pp. 114-118). Westview Press.
- Corrêa, M. M., Silva, P. S. D., Wirth, R., Tabarelli, M. y Leal, I. R. (2010). How leaf-cutting ants impact forests: drastic nest effects on light environment and plant assemblages. *Oecologia*, 162(1), 103-115.
- Della Lucia, T. M. C. (2003). Hormigas de importancia económica en la región Neotropical. En Fernández, F. (Comp.), *Introducción a las hormigas de la región neotropical* (pp. 337-349). Instituto Humboldt.
- Herz, H., Beyschlag, W. y Hölldobler, B. (2007). Herbivory rate of leaf-cutting ants in a tropical moist forest in Panama at the population and ecosystem scales. *Biotropica*, 39(4), 482-488.
- Hölldobler, B. y Wilson, E. O. (1990). *The ants*. Harvard University Press.

- Jones, D. B., Adams, R. H. y Thompson, L. C. (1994). Assessment of baits for fire ant control in southern Arkansas. *Arkansas Farm Res.*, 43(2), 8-9.
- Katzenstein, G.A. (2021). *Ritmos de actividad en hormigas cortadoras de hojas Acromyrmex lundii: efecto del fotoperíodo y ciclo térmico en su variación anual*. [Tesis de Magister en Ciencias Agrarias, Universidad de la República, Uruguay].
- Leal, I. R., Wirth, R. y Tabarelli, M. (2014). The multiple impacts of leaf-cutting ants and their novel ecological role in human-modified neotropical forests. *Biotropica*, 46(5), 516-528.
- Meyer, S. T., Roces, F. y Wirth, R. (2006). Selecting the drought stressed: effects of plant stress on intraspecific and within-plant herbivory patterns of the leaf-cutting ant *Atta colombica*. *Funct. Ecol.*, 20(6), 973-981.
- Robinson, S.W. y Fowler, H.G. (1982). Foraging and pest potential of Paraguayan grass-cutting ants (*Atta* and *Acromyrmex*) to the cattle industry. *J Appl Entomol*, 93, 42-54.
- Roces, F. y Lighton, J. R. B. (1995). Larger bites of leaf-cutting ants. *Nature*, 373, 392-393.
- Röschard, J. y Roces, F. (2003). Fragment-size determination and size-matching in the grass-cutting ant *Atta vollenweideri* depend on the distance from the nest. *J. Trop. Ecol.*, 19, 647-653.
- Sabattini, J.A., Sturniolo, F., Bollazzi, M., y Bugnon, L.A. (2023). AntTracker: A low-cost and efficient computer vision approach to research leaf-cutter ants behavior. *Smart Agricultural Technology*, 5(100252). <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100252>
- Sabattini, J.A., Reta, J.M., Bugnon, L.A., Cerrudo, J.I., Sabattini, R.A., Peñalva, A., Bollazzi, M., Paz, M.O., y Sturniolo, F. (2022). AntVRecord: Autonomous system to capture the locomotor activity of leafcutter ants. *HarwareX*, 11(e00270). <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00270>
- Sabattini, J.A. (2019). *Impacto de hormigas cortadoras de hojas en ecosistemas implantados de Sudamérica* [Tesis de Especialidad, Universidad Nacional del Nordeste].
- Vasconcelos, H. L. y Fowler, H. G. (1990). Foraging and fungal substrate selection by leaf-cutting ants. En Vander Meer, R. K., Jaffe, K. y Cedenio, A. (Comps.), *Applied myrmecology, a world perspective* (pp. 410-419). Westview Press.
- Weber, N. A. (1972). *Gardening ants, the attines*. Memoirs of the American Philosophical Society.
- Wirth, R., Herz, H., Ryel, R. J., Beyschlag, W. y Holldobler, B. (2003). *Herbivory of leaf-cutting ants. A case study on Atta colombica in the tropical rain forest of Panama*. Springer.
- Zanetti, R. (2007). *Manejo integrado de formigas cortadeiras*. *Notas de Aula de Entomologia*. Universidade Federal de Lavras.
- Zanetti, R., Zanuncio, J. C., Santos, J. C., Silva, W. L. P. D., Ribeiro, G. T. y Lemes, P. G. (2014). An overview of integrated management of leaf-cutting ants (Hymenoptera: Formicidae) in Brazilian forest plantations. *Forests*, 5(3), 439-454.
- Zanuncio J.C., Lemes P., Antunes L.R., Maia J.L., Mendes J.E.P., Tanganelli K.M., Salvador J.F. y Serrão J.E. (2016). The impact of the Forest Stewardship Council (FSC) pesticide policy on the management of leaf-cutting ants and termites in certified forests in Brazil. *Annals of Forest Science*, 73, 205-215.