



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Gandia

Investigación y aplicación de medidas preventivas para el control y gestión de plagas enfocadas en *Thaumetopoea pityocampa* en La Rioja Media: estudio a nivel local y perspectiva europea

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ciencias Ambientales

AUTOR/A: Sierra Causapé, Guillermo

Tutor/a: Martínez Nieto, María Isabel

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA POLITÈCNICA SUPERIOR DE GANDIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA POLITÈCNICA
SUPERIOR DE GANDIA

**“ INVESTIGACIÓN Y APLICACIÓN DE MEDIDAS PREVENTIVAS
PARA EL CONTROL Y GESTIÓN DE PLAGAS ENFOCADAS EN
THAUMETOPOEA PITYOCAMPA EN LA RIOJA MEDIA: ESTUDIO A
NIVEL LOCAL Y PERSPECTIVA EUROPEA ”**

TRABAJO FINAL DE GRADO

Autor/a: Guillermo Sierra
Causapé

Tutor/a: M^a Isabel Martínez Nieto

GANDIA, 2022/2023

I. RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Grado se enfoca en el estudio de la procesionaria del pino (*Thaumetopoea pityocampa* Den. y Schiff) en la región de La Grajera, La Rioja. Esta especie representa una amenaza para los ecosistemas de pinos (*Pinus halepensis* Mill.), ya que su actividad defoliadora puede llevar a la destrucción de estos árboles, así como a la disminución de otras especies clave en la cadena trófica.

El estudio reconoce la complejidad del ciclo de vida de la procesionaria, lo que dificulta la aplicación de medidas efectivas de control. Sin embargo, se identifican alternativas sostenibles, como el uso de bioinsecticidas como el *Bacillus thuringiensis* Ber., anillos mecánicos, feromonas y la reintroducción de aves depredadoras de la procesionaria del pino.

Una propuesta innovadora incluye la utilización de drones equipados con sensores RGB para mapear la presencia de nidos en los árboles, lo que permitiría una gestión a largo plazo más precisa y efectiva de la especie.

Además, el trabajo analiza el aumento de la distribución de la procesionaria en Europa, atribuido al cambio climático y el aumento de las temperaturas entre 1994 y 2022. Esto destaca la importancia de continuar investigando y aplicando medidas de gestión para mantener un equilibrio en los ecosistemas donde la procesionaria está presente, manteniendo así la biodiversidad y la salud de los bosques afectados.

Este estudio proporciona una amplia visión de los desafíos y soluciones asociados con la procesionaria del pino, destacando la necesidad de medidas sostenibles y la importancia de la investigación continua en este campo.

II. ÍNDICE

I. RESUMEN.....	2
II. ÍNDICE.....	3
1. INTRODUCCIÓN.....	5
1.1. Contexto.....	5
1.2. Justificación.....	5
1.3. Objetivos.....	6
1.4. "Relevancia de los Estudios Previos y Justificación de su Aplicación en este TFG".....	7
1.5. Especies de estudio: <i>Thaumetopoea pityocampae</i>	7
1.5.1. Descripción.....	7
1.5.2. Ciclo vital.....	8
1.5.3. Daños.....	17
1.5.4. Depredadores.....	17
1.6. Especies de estudio: <i>Pinus halepensis</i>	17
1.6.1. <i>Pinus halepensis</i>	18
1.6.1.1. Descripción.....	18
1.6.1.2. Ecología.....	19
1.6.1.3. Distribución y hábitat.....	19
1.7. Zona de estudio.....	20
1.8. Revisión de la literatura.....	23
1.9. Gestión Sostenible de la Procesionaria del Pino y su Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).....	23
2. METODOLOGÍA.....	25
2.1. Diseño de investigación.....	25
2.2. Procedimientos para recopilación de datos.....	25
2.3. Análisis cartográfico.....	26
2.4. Análisis de temperaturas.....	27
2.5. Técnicas empleadas para la gestión de la procesionaria del pino.....	27
3. Resultados.....	27
3.1. Expansión de <i>Thaumetopoea pityocampa</i> especie en España y Europa.....	27
3.2. Interacción de <i>Thaumetopoea pityocampa</i> con las temperaturas en un caso de estudio concreto.....	31
3.3. Efecto de la temperatura en la alimentación y su expansión debido al cambio climático.....	33
3.4. Temperatura mínima y máxima letal de <i>Thaumetopoea pityocampa</i>	34
3.5. Influencia de las Temperaturas Extremas y Umbrales de Alimentación en el Desarrollo de la Especie.....	34
3.6. Adaptación de <i>Thaumetopoea pityocampa</i> al calentamiento global y su adaptación.....	35
3.7. Técnicas empleadas en el área de estudio.....	36
3.8. Estrategias de control de plagas existentes.....	37
3.8.1. Control químico mediante insecticidas.....	37

3.8.2. Control biológico- químico mediante el uso de Bacillus Thuringiensis.....	38
3.8.3. Control mecánico mediante Anillos.....	40
3.8.4. Confusión sexual con feromonas.....	41
3.8.5. Captura masiva con feromonas.....	43
3.8.6. Aves insectívoras.....	44
3.9. Desarrollo de nuevas estrategias de control específicas.....	47
3.10. Aplicación de técnicas ya conocidas que no se están utilizando en terreno local.....	49
3.10.1. Reintroducción de aves.....	50
3.10.2. Utilización de elementos biológicos.....	54
3.10.3. Utilización de anillos mecánicos.....	55
3.11. Análisis DAFO.....	56
4. Discusión.....	58
5. Conclusión.....	59
6. Referencias bibliográficas.....	61

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto

En los últimos años, se ha registrado un incremento significativo de la presencia de la especie *Thaumetopoea pityocampa* en España y Europa. Este fenómeno se atribuye principalmente al aumento de las temperaturas (Battistil et al., 2005), lo que ha generado una creciente amenaza tanto para los bosques de *Pinus* y en menor medida *Cedrus* como para los seres humanos y los animales, tanto domésticos como silvestres. Ante esta situación, resulta imprescindible buscar soluciones efectivas que permitan contener la expansión de esta especie y asegurar la seguridad de los entornos naturales.

La *Thaumetopoea pityocampa*, también conocida como procesionaria del pino, representa un riesgo debido a sus pelos urticantes, los cuales pueden provocar reacciones alérgicas graves en las personas y animales que entran en contacto con ellos. Además, estas orugas son capaces de causar daños significativos a los bosques, poniendo en peligro la salud de los ecosistemas y su biodiversidad.

Ante esta problemática, es fundamental tomar medidas para controlar la expansión de la *Thaumetopoea pityocampa*. Esto implica la implementación de estrategias de gestión y control de plagas que sean efectivas y respetuosas con el medio ambiente. Es necesario investigar y desarrollar técnicas que permitan reducir la población de estas orugas de manera segura y sostenible.

1.2. Justificación

La proliferación de la especie *Thaumetopoea pityocampa*, comúnmente conocida como la procesionaria del pino, ha emergido como una problemática ambiental y de salud pública en diversas regiones. Esta especie de insecto defoliador es nativa de varias áreas forestales de Europa y del Mediterráneo, y su impacto se ha vuelto más evidente en los últimos años debido a factores como el cambio climático y la expansión de áreas urbanas hacia zonas boscosas. Los efectos perjudiciales de la *T. pityocampa* se manifiestan en múltiples aspectos, incluida la devastación de bosques de coníferas, el riesgo para la salud humana y la afectación de ecosistemas completos.

La *T. pityocampa* es conocida por su característico comportamiento de formar procesiones en busca de alimento durante su fase larval. Estas procesiones pueden llevar a la defoliación de pinos y otras coníferas, comprometiendo la salud de los bosques y disminuyendo la biodiversidad vegetal. Además, los pelos urticantes presentes en las

orugas pueden causar reacciones alérgicas y problemas respiratorios en seres humanos y animales que entran en contacto con ellos. A medida que la *T. pityocampa* continúa expandiéndose a nuevas áreas geográficas debido a la globalización y el comercio internacional, es esencial abordar esta problemática de manera integral, considerando tanto aspectos ambientales como de salud pública (Battisti y Fanigliulo, 2019).

1.3. Objetivos

El objetivo de este estudio es abordar la gestión y control de plagas de *T. pityocampa* en un lugar concreto (La Grajera - La Rioja). Para ello, se llevará a cabo una investigación sobre las medidas que se están implementando en otros lugares de España y Europa. El propósito es identificar aquellas medidas que puedan ser aplicadas a nivel local, evaluando su viabilidad en el área de estudio, además, de observar la expansión que ha tenido esta especie durante los últimos 28 años a nivel Europeo, asumiendo la importancia de la aplicación de medidas que ayuden a controlar de forma efectiva y sostenible la especie.

Además, se analizará cómo el cambio climático ha contribuido al avance de la procesionaria por Europa en los últimos 28 años, revelando así la necesidad de seguir investigando en medidas más efectivas e innovadoras para el posterior control de la especie.

Las medidas propuestas pueden incluir tanto intervenciones humanas, mediante la implementación de elementos diseñados específicamente, como el uso de otras especies que no interfieran en el equilibrio de la fauna y flora local. Es importante destacar que no se excluye la posibilidad de combinar ambas estrategias, siempre y cuando sean compatibles y efectivas.

El objetivo final es encontrar soluciones y tomar acciones concretas para la gestión y control de la plaga en cuestión, tomando como referencia las experiencias exitosas en otros lugares. Con este enfoque, se espera encontrar alternativas adecuadas y sostenibles que contribuyan a preservar el equilibrio ambiental en el área de estudio.

1.4. "Relevancia de los Estudios Previos y Justificación de su Aplicación en este TFG"

La utilización de recursos bibliográficos en este proyecto son de gran relevancia, dado que estos aportan información fundamental para comprender y analizar la biología de la especie bajo estudio. Además, permiten comprender la relación directa que esta especie mantiene con eventos climatológicos, como la temperatura y las precipitaciones, así como su estrecha vinculación con su desarrollo y expansión a través de otras especies que le sirven como fuente de alimento. Es igualmente necesario comprender las limitaciones que enfrenta esta especie y por qué la temperatura representa un parámetro limitante en su desarrollo y expansión. Esto nos aporta la capacidad de llevar un seguimiento de cómo el aumento de las temperaturas año tras año está provocando la expansión de esta plaga hacia lugares que antes eran inaccesibles.

Frente a estas afirmaciones, es importante destacar la necesidad de conocer las medidas y alternativas que se están implementando en áreas afectadas para su adecuado control y gestión. Esto contribuye a prevenir la alteración de la cadena trófica en los lugares afectados. Gracias a este conocimiento adquirido, se puede llevar a cabo una gestión apropiada y sostenible en la zona de estudio, garantizando así la conservación del equilibrio ecológico en dicha área.

1.5. Especies de estudio: *Thaumetopoea pityocampae*

1.5.1. Descripción

Thaumetopoea pityocampa, conocida comúnmente como la procesionaria del pino, es un insecto defoliador que se encuentra en varias áreas forestales de Europa y el Mediterráneo. La procesionaria del pino, un miembro de la familia Thaumetopoeidae dentro del orden Lepidóptera, exhibe diferencias notables entre sus sexos. En términos de tamaño, las hembras superan ligeramente a los machos, con una envergadura que oscila entre 36 y 49 mm, en comparación con los 31 a 39 mm de envergadura de los machos. Ambos géneros presentan un tórax cubierto de pelos grisáceos.

Las alas anteriores de esta mariposa están coloreadas en un tono gris ceniza, adornadas con tres franjas transversales de tono oscuro. Estas franjas son visibles tanto en los machos como en las hembras, aunque estas últimas presentan algunas diferencias sutiles. Las hembras muestran una coloración similar en las franjas, pero con pequeñas variaciones como una mayor visibilidad de los nervios y bordes más oscuros. Además, las

franjas transversales en las hembras tienden a ser menos perceptibles en comparación con las de los machos (Denis y Schiffermüller, 1775).

Las larvas de la polilla procesionaria del pino son gregarias y se desarrollan dentro de un llamativo nido de seda, que normalmente construyen en una rama o en la copa de un árbol para maximizar la exposición al sol.

La oruga de la procesionaria del pino atraviesa cinco etapas de desarrollo, cada una marcada por una muda, y alcanza una longitud final de entre 30 y 40 mm en su quinto estadio. Durante su fase de oruga, es fácilmente identificable debido a su comportamiento de desplazamiento, donde se alinea en una larga fila junto a sus hermanas, lo que le otorga el nombre de "procesionaria".

Cada una de estas orugas que forma parte de la procesión está cubierta por una densa capa de pelos urticantes, que les sirve como defensa contra los depredadores y que son capaces de arrojar si se sienten amenazadas. Además, estas orugas de procesionaria construyen nidos de seda blanca en los árboles, conocidos como "bolsones", donde pasan el invierno hasta que llega el momento de enterrarse para su metamorfosis y convertirse en mariposas.








1.5.2. Ciclo vital

La polilla procesionaria tiene, generalmente un ciclo de vida anual, sin embargo, se ha detectado que en ciertas regiones de grandes alturas, este ciclo puede llegar a durar hasta dos años.

Tabla 1. Ciclo vital *T. pityocampae*

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
											
											
											
	 	 									
											
											
											
											

Tabla 2. Leyenda ciclo vital *T. pityocampae*

Leyenda			
Huevos		Adultos (1 ^{er} año)	
Orugas		Adultos (Diapausa)	
Procesiones	 		
Crisálidas			

Fases de la oruga procesionaria:

- **Huevo:** Esta marca el inicio del ciclo de vida de la especie, siendo el huevo el punto de partida. Después de la fertilización interna en la hembra, los huevos son colocados en los árboles y permanecen allí durante un período de 30 a 40 días antes de eclosionar. Una característica interesante es que la hembra produce una especie de escamas que cubren los huevos, imitando los brotes de los pinos donde son depositados. Esta puesta se produce en el mes de Julio, y la eclosión generalmente ocurre entre los meses de Agosto y Septiembre.
- **Oruga:** Esta etapa, también llamada larva, es la más prolongada en la vida de la especie, extendiéndose durante aproximadamente seis meses, donde se producen los conocidos 5 estados larvarios (Denis y Schiffermüller, 1775) , aunque en zonas más frías puede llegar a durar hasta 9 meses. A lo largo de este tiempo, la oruga experimenta variaciones externas en cuanto a su color y tamaño. Esta fase de la oruga es la que plantea más desafíos para los seres humanos y animales de compañía, ya que es cuando se observa una mayor incidencia de lesiones. Por lo general, a partir de febrero, las orugas descienden de los pinos. Una vez concluida esta fase, la oruga se entierra en el suelo, donde forma una pupa o crisálida dentro de un capullo.
 - **1^{er} estado larvario:** En esta fase inicial del ciclo, los huevos eclosionan después de 30-40 días desde su puesta en el mes de julio. Esto marca el comienzo del ciclo larvario de las orugas, que se inicia alrededor de agosto en regiones cálidas y aproximadamente en octubre en áreas más frías. Durante este período, las larvas se alimentan de las acículas de diversos árboles, principalmente del género *Pinus*, lo que puede resultar en una defoliación limitada debido a su estado temprano.

Durante este primer estadio, las colonias de orugas trabajan en conjunto para crear pequeñas bolsas de seda, las cuales se ubican estratégicamente en las áreas más expuestas al sol en el árbol. Estas bolsas de seda cumplen la función de resguardar a las orugas durante los meses invernales, proporcionándoles protección contra las bajas temperaturas. Cada noche, después de haberse alimentado, las orugas se refugian en estas bolsas de seda, formando así un patrón de comportamiento que les permite enfrentar las condiciones climáticas adversas.



Figura 1. 1er estadio larvario de *T. pityocampae* (J. Alemany fitosanitarys, s.f.)

- **2° estado larvario:** En este estado las larvas siguen alimentándose y desarrollándose.



Figura 2. Nido de *T. pityocampae* en su 2° estado larvario, donde las orugas ya han empezado a trabajar en colonia con la aparición de nidos de tamaño y grosor reducido. (García, s.f.)

- **3^{er} estado larvario:** Las orugas experimentan el desarrollo de pelos urticantes y elaboran bolsones sustancialmente más densos en las ramas de los árboles, que les servirán de refugio durante la temporada invernal. Dentro de estos refugios, las orugas permanecen durante los períodos diurnos, protegiéndose de las condiciones ambientales adversas propias de la estación fría. Al llegar el atardecer, emergen de estos refugios para buscar alimento, aprovechando las horas de menor frío y oscuridad para llevar a cabo sus actividades alimentarias.



Figura 3. Nido de *T. pityocampae* en su 3^{er} estado larvario, con la aparición de pelos urticantes y cambio de coloración (García, s.f.)

- **4^o estado larvario:** En el cuarto estadio larvario de la procesionaria, la oruga suele ser más grande que en los estadios anteriores.
- **5^o estado larvario:** En esta fase final del ciclo larvario, las orugas adquieren un apetito voraz y, durante un período de aproximadamente 30 días que dura desde febrero hasta abril, culminando al final del invierno, se dedican mayoritariamente a la alimentación. En esta última etapa, las orugas descienden en conjunto y establecen lo que se conoce como "procesiones", organizándose en fila y siguiendo un hilo de seda que segregan para mantenerse unidas. Esta estrategia grupal tiene como propósito proteger sus cabezas de aves depredadoras. De esta forma aumentan su posibilidad de supervivencia.

La hembra lidera esta procesión, asumiendo el papel de guía para el grupo. Su objetivo es encontrar áreas que satisfagan las necesidades térmicas del conjunto. En entornos más fríos o templados, la hembra busca zonas soleadas y cálidas, mientras que en climas cálidos, busca lugares más sombreados.

Finalmente, es importante destacar que la temperatura ideal para establecer su enterramiento, donde se completará la transformación, es alrededor de 20° C. En este ambiente térmico óptimo, las orugas realizarán la metamorfosis.



Figura 4. Nido de *T. pityocampa* en su último estadio larvario (Gálvez, s.f.)

Tabla 3. Estado larvario *T. pityocampae*

Días	1			5			10			15			20			25			50			
1 ^{er} estadio	■	■	■	■	■	■	■															
2 ^o estado				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■					
3er estado													■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
4 ^o estado																				■	■	■
5 ^o estado																						

Días	80					100					120						150
1 ^{er} estado																	
2 ^o estado																	
3er estado																	
4 ^o estado																	
5 ^o estado																	

- **Pupa:** En el caso de polillas y mariposas, esta etapa del ciclo de vida se denomina comúnmente "**crisálidas**". Aquí es donde se producen los cambios más significativos en el individuo a través del proceso de metamorfosis de larva a adulto. Las orugas no tejen simultáneamente los capullos individuales, sino que lo hacen a lo largo de varios días (J. A. Pascual et al., 1988). Este proceso ocurre en el suelo y tiene una duración de aproximadamente 2 o 3 meses.
 - **Metamorfosis:** La oruga, inicialmente con una longitud de alrededor de 20 mm y una coloración blanca, parda o amarillenta, cambia posteriormente a una tonalidad rojiza oscura. La transformación de la oruga procesionaria en adulto tiene lugar dentro del capullo. Un adulto tiene una envergadura de entre 36 y 49 mm en el caso de las hembras y de 31 a 39 mm en los machos. Dependiendo de las condiciones ambientales, en algunos casos la pupa puede permanecer en estado de diapausa, en el cual su desarrollo se suspende. En esta situación, la pupa puede mantenerse en este estado inactivo durante varios años y emerger como adulta una vez que haya completado la metamorfosis.
- **Adulto:** Esta es la fase más breve del ciclo de vida, con una duración máxima de tan solo dos días. Por lo tanto, el objetivo principal de esta fase es llevar a cabo la reproducción y asegurar la continuidad de la especie.
 - **Reproducción:** Al emerger del suelo, los adultos buscan reproducirse lo más pronto posible debido a su corta esperanza de vida. Después de la fecundación interna, las hembras, que tienen una menor capacidad de vuelo en comparación con los machos, se desplazan para encontrar el árbol donde depositarán sus huevos, especialmente en las hojas en forma de aguja de los pinos. En promedio, las hembras de las polillas recorren alrededor de 1,7 kilómetros para depositar sus huevos, pudiendo llegar a poner alrededor de

220 huevos por individuo. Además, esta especie tiende a reproducirse durante la noche, lo que implica que la comunicación entre machos y hembras se lleva a cabo mediante feromonas.

- **Descripción morfológica:** En las siguientes tablas, se van a describir cómo (Luis Núñez. Cap del Servei de Sanitat Forestal) son cada individuo de cada género de la especie estudiada.

Tabla 4. Descripción del adulto hembra de la especie *T. pityocampae*

Hembra	
Envergadura	36-49 mm
Antenas	Pectinadas de aspecto filiforme
Tórax	Cubierto de pelos grises
Abdomen	Cilíndrico, grueso y recubierto en el extremo por un conjunto de escamas de color amarillo dorado
Alas anteriores	Coloración gris ceniza donde destacan las nerviaciones y los bordes más oscuros, así como tres rallas transversales menos aparentes que en los machos.
Alas posteriores	Son más blanquecinas. Típica mancha oscura en la región anal.



Figura 5. Foto hembra adulta *T. pityocampae* (Lepispteron, 2016)

Tabla 5. Descripción del adulto macho de la especie *T. pityocampae*

Macho	
Envergadura	31-39 mm
Antenas	Bien pectinadas
Tórax	Cubierto por abundantes pelos.
Abdomen	Es más delgado que el de la hembra y presenta una forma cónica con abundantes pelos en la extremidad.
Alas anteriores	De color gris de intensidad muy variable donde predominan tres rallas transversales.
Alas posteriores	Son más blanquecinas. Típica mancha oscura en la región anal.



Figura 6. Foto macho adulta *T. pityocampae* (Molina, s.f.)

1.5.3. Daños

Los daños ocasionados por la procesionaria del pino son principalmente defoliaciones, un proceso en el cual las orugas se alimentan de las hojas de los árboles. Por lo general, esta defoliación no impide que los árboles experimenten un nuevo crecimiento foliar, lo que les permite recuperarse en parte de los efectos del ataque. Sin embargo, cuando la infestación es severa, los árboles tienen dificultades para alcanzar su desarrollo normal. Esto a menudo conduce a un debilitamiento general de la salud del árbol, dejándolo vulnerable a enemigos oportunistas como hongos e insectos perforadores, que aceleran su deterioro. En casos extremos, esta debilidad puede resultar en la muerte del árbol.

Los hongos y los insectos perforadores, atraídos por el estrés y la debilidad del árbol causados por la procesionaria, pueden causar daños adicionales al penetrar en la madera del árbol y debilitar aún más su estructura. Esto crea un ciclo negativo en el que la presencia de la procesionaria no solo afecta las hojas del árbol, sino que también tiene un impacto negativo en su salud general y su capacidad para defenderse contra otros problemas bióticos. Por lo tanto, el control y la gestión adecuados de la procesionaria del pino son esenciales para preservar la salud de los bosques y árboles afectados.

1.5.4. Depredadores

Durante la fase de oruga sus depredadores predominantes son los pájaros insectívoros (herrerillos, carboneros, etc...), así como una serie de insectos parasitoides que infectan a las orugas introduciendo sus huevos en el interior de estas para que la larva al nacer se alimente de los tejidos de la orugas. Así mismo existen otros parásitos que realizan las mismas acciones sobre los huevos e incluso sobre las orugas mientras están enterradas

1.6. Especies de estudio: *Pinus halepensis*

Las especies de estudio que se verían afectadas principalmente estarían separadas en dos grupos.

- **Grupo 1:** *Pinus nigra*, *Pinus canariensis* y *Pinus sylvestris*
- **Grupo 2:** *Pinus pinea*, *Pinus pinaster* y *Pinus halepensis*.

Según esta jerarquía, el grupo 1 sería más susceptible a ser atacado por *T. pityocampa*, y en el caso de la área estudiada, *Pinus halepensis* entraría dentro del grupo 2 el cual sería menos susceptible a ser atacado, pero que independientemente de eso, tras haber hecho un reconocimiento visual del área estudiada, la cantidad de procesionaria presente en la zona seguiría siendo peligrosa para los seres humanos y los animales de compañía.

Esta especie también atacaría a otras especies de la familia Pinaceae, pero en este caso, no sería una especie presente en La Grajera.

1.6.1. *Pinus halepensis*

1.6.1.1. Descripción

Árbol caracterizado por su altura que puede llegar a los 20 metros, con un tronco a menudo de forma retorcida. Tanto la corteza como las ramillas presentan tonos grisáceos o blanquecinos. Sus hojas crecen en pares, son finas y alargadas, adoptando la forma de acículas, con una longitud promedio de 6-10 cm y un grosor de aproximadamente 1 mm, o incluso menos. Las piñas que produce son de tamaño reducido, midiendo entre 4 y 8 cm de longitud. Están unidas al árbol por un pedúnculo de grosor variable, que mide alrededor de 1-2 cm. Los piñones, también pequeños, presentan una ala que les permite dispersarse cuando la piña madura y se abre. Es importante destacar que los ejemplares adultos retienen numerosas piñas secas de años anteriores en sus ramas, una característica distintiva que facilita su identificación frente a otras especies similares (Arbolapp, s.f.)



Figura 7. Pinar situado en el parque natural de la Grajera

1.6.1.2. Ecología

Este tipo de pino prospera en climas de carácter mediterráneo, donde la presencia de sol es abundante y las precipitaciones excesivas o el frío extremo son escasos. Su desarrollo es óptimo en laderas que carecen de humedad, especialmente en suelos cálidos o con contenido de yeso, situados en las proximidades de zonas costeras. Se encuentra distribuido desde niveles del mar hasta altitudes de 1000 metros, aunque en ciertas cadenas montañosas del sur puede llegar a asentarse a elevaciones de hasta 1600 metros.

1.6.1.3. Distribución y hábitat

Está presente en bosques secos, de tipo mediterráneo, de Europa, Asia occidental y África del norte. A lo largo de la historia de las repoblaciones en la península ibérica, el *pinus halepensis* ha sido muy utilizado, lo que ha favorecido a su expansión por todo el territorio.



Figura 8. Distribución de la especie *Pinus Halepensis* (Caudullo et al., 2016)

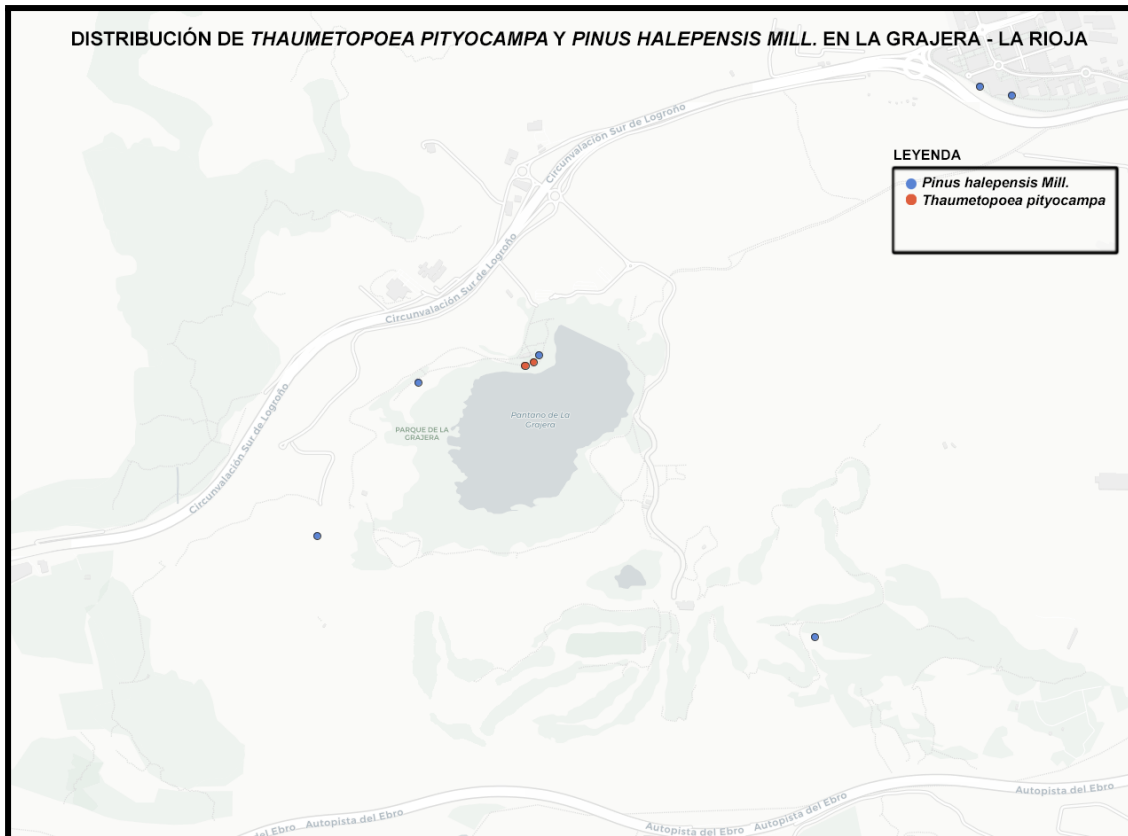


Figura 9. Registros georeferenciados de *Pinus Halepensis* y *T. pityocampa* en La Grajera (Base de datos GBif)

1.7. Zona de estudio

La zona de estudio seleccionada para este proyecto se encuentra en la comunidad autónoma de La Rioja, específicamente en un parque natural de interés comunitario situado al suroeste de Logroño, la capital de la región. Este parque natural fue establecido en el año 1883 y se construyó sobre lo que fue una pequeña laguna endorreica utilizada para almacenar agua del río Iregua y regar las huertas del sur de la ciudad. A lo largo de los años, se ha acondicionado y transformado en un espacio recreativo y de conservación (Sociedad Española de Presas y Embalses).

La Grajera, como se conoce a este parque natural, destaca por ser una de las pocas zonas húmedas existentes en la región. Es un hábitat de numerosas especies vegetales y animales, donde se fomenta el respeto por la naturaleza y se ofrecen actividades lúdicas, deportivas y educativas para los visitantes (Calleja, 2022).

Este espacio natural alberga diversas especies protegidas, como el vencejo común, el vencejo real, el ánade azulón, el busardo ratonero, el aguilucho lagunero, el aguilucho cenizo, el cernícalo, la paloma torcaz, la oropéndola, el mirto, el autillo, entre otros.

La zona de estudio abarca tanto la lámina de agua, que ocupa una superficie de 32 hectáreas y tiene una profundidad media de 5,5 metros, como la vegetación que la rodea. Por lo tanto, se prohíben actividades como el baño, el buceo y los paseos en barca, y solo se permiten acciones con fines científicos y/o educativos, en aras de preservar y proteger este valioso ecosistema.

Para comprender cómo *T. pityocampa* ha ido proliferando en la zona de estudio delimitada, se ha recurrido a dos mapas cartográficos representativos de diferentes momentos clave, la **Figura 10A**, representando la zona de estudio en el año 1977 y la **Figura 10B**, representando la zona de estudio en el año 2020. La comparación de estos mapas revela una significativa transformación en el paisaje de la zona de estudio. Durante este periodo de más de cuatro décadas, el espacio natural protegido ha experimentado cambios drásticos en su estructura y composición. Dichos cambios han tenido un impacto directo en la proliferación y expansión de la especie estudiada. El estudio detallado de cómo ha evolucionado la zona de estudio a lo largo de los años y cómo está evolución ha influido en el crecimiento y propagación de *T. pityocampa*, es fundamental para comprender la dinámica de esta problemática y desarrollar estrategias efectivas de control.

1.8. Revisión de la literatura

En el marco de la investigación llevada a cabo en este proyecto, se han utilizado diversos artículos científicos que han contribuido al entendimiento de la biología de la procesionaria del pino. Estos estudios han proporcionado información relevante para comprender cómo se desarrolla esta especie y cómo interactúa con las variaciones de temperatura, un factor crítico para su supervivencia.

Uno de los hallazgos significativos ha sido la influencia del cambio climático en la expansión de la procesionaria del pino en Europa, ya que el aumento de las temperaturas ha permitido que colonice áreas previamente inaccesibles debido a cambios en su temperatura letal inferior.

Además de ello, se ha examinado detenidamente las estrategias y métodos empleados en la actualidad para el control y prevención de plagas de procesionaria del pino, así como su impacto en la salud humana y en la fauna local.

También se destaca la importancia de utilizar depredadores naturales en la gestión de la procesionaria del pino, lo que no solo contribuye al control de la especie, sino que también protege a los árboles de los géneros *Pinus* y *Cedrus*, que son vulnerables a sus efectos. Además, la reintroducción de otras especies como parte de esta gestión puede fomentar la diversidad biológica en el ecosistema en estudio.

Por último, en este contexto, se ha destacado la necesidad de contar con herramientas eficaces para llevar un seguimiento preciso en la cantidad de bolsones en los pinares de La Grajera. Esta conclusión se basa en la importancia cada vez mayor de gestionar de manera efectiva nuestros recursos naturales. Saber con detalle dónde están y cuántos hay de manera aproximada se ha vuelto fundamental para tomar decisiones futuras. Es por ello, que el uso de drones para el mapeo se presenta como una posible solución innovadora y precisa que permitirá tomar medidas adecuadas para conservar y gestionar de forma sostenible el ecosistema estudiado.

1.9. Gestión Sostenible de la Procesionaria del Pino y su Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

La gestión de la plaga de la procesionaria del pino se entrelaza con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por las Naciones Unidas. Estos objetivos son

marcos globales para abordar desafíos sociales, económicos y ambientales de manera integral. En el caso de la gestión de plagas como la procesionaria, se destacan las siguientes conexiones con los ODS:

ODS 15 - Vida de Ecosistemas Terrestres: La gestión de la procesionaria del pino está directamente relacionada con el ODS 15, ya que busca preservar la vida terrestre y mantener la biodiversidad. Al controlar y prevenir la propagación de esta plaga, se contribuye a mantener el equilibrio de los ecosistemas forestales y se protege a otras especies que dependen de esos ecosistemas.

ODS 3 - Salud y Bienestar: La gestión de la procesionaria también se vincula con el ODS 3, que promueve la salud y el bienestar. Al reducir la exposición de las personas y los animales domésticos a las larvas urticantes de la procesionaria, se minimizan los riesgos para la salud, lo que se alinea con este objetivo.

ODS 12 - Producción y Consumo Responsables: La adopción de enfoques de gestión sostenible para controlar la plaga se conecta con el ODS 12, que busca promover la producción y el consumo responsables. Al utilizar métodos de control que minimizan el uso de productos químicos dañinos para el medio ambiente, se contribuye a un manejo más responsable de los recursos naturales.

ODS 17 - Alianzas para Lograr los Objetivos: La gestión de la procesionaria del pino también se relaciona con el ODS 17, que aboga por la construcción de alianzas y colaboraciones. La cooperación entre diferentes actores, como científicos, gobiernos locales y comunidades, es esencial para desarrollar estrategias efectivas de gestión de plagas y lograr resultados sostenibles.

En resumen, la gestión sostenible de la plaga de la procesionaria del pino contribuye directamente a varios Objetivos de Desarrollo Sostenible, al abordar preocupaciones ambientales, de salud y bienestar, producción responsable y cooperación entre diferentes partes interesadas. Estas conexiones subrayan la importancia de abordar la plaga no solo como un problema localizado, sino como parte de un esfuerzo más amplio para alcanzar un futuro más sostenible y equilibrado.

2. METODOLOGÍA

2.1. Diseño de investigación

Este Trabajo de Fin de Grado se fundamenta en un enfoque integral que se centra principalmente en la investigación bibliográfica y cualitativa para abordar la problemática de la gestión de plagas de *T. pityocampa* en la zona de estudio de La Grajera, La Rioja..

- **Enfoque cualitativo:** La base de esta investigación radica en una revisión bibliográfica exhaustiva que abarca estudios y experiencias en diversos lugares ubicados en el Mediterráneo. A través de este enfoque, se ha obtenido una comprensión profunda de las medidas que se están implementando en varios contextos y sus resultados. Además, se han analizado enfoques existentes y se han extraído recomendaciones específicas que se pueden aplicar a la situación particular de La Grajera. Este enfoque cualitativo respalda la formulación de medidas adoptadas y promueve un entendimiento profundo de las estrategias de control empleadas.

La combinación de los hallazgos recopilados en la revisión bibliográfica con perspectivas cualitativas proporciona una visión completa y contextualizada de la problemática de la gestión de la plaga de la especie estudiada en La Grajera.

2.2. Procedimientos para recopilación de datos

El proceso de recopilación de datos es esencial para fundamentar la investigación sobre la especie *T. pityocampa* y establecer una base sólida para el análisis y las conclusiones que derivan del estudio. Por tanto, para recopilar información relevante se han seguido los siguientes procedimientos

- **Búsqueda y selección de literatura científica:** Se realizó una búsqueda exhaustiva en bases de datos científicas y repositorios especializados en biología y entomología forestal. Los términos clave utilizados incluyen "*Thaumetopoea pityocampa*", "procesionaria del pino", "control de plagas forestales", "biología de insectos", entre otros. Se han seleccionado artículos científicos que abordan aspectos como las medidas de control, la biología de la especie y la distribución geográfica. La revisión de estos artículos ha proporcionado un marco teórico sólido para la investigación.
- **Análisis del contenido de los artículos científicos:** Los artículos científicos seleccionados han sido analizados para extraer información pertinente. Se han registrado datos relativos a las medidas de control implementadas, aspectos biológicos de la especie y su distribución geográfica. Este análisis ha permitido establecer un marco teórico sólido.

- **Experiencia personal y conocimiento local:** La familiaridad acumulada con la zona de estudio, producto de visitas recurrentes, también ha contribuido a la recopilación de datos. El conocimiento adquirido sobre la distribución de la especie y su relación con el entorno ha enriquecido la perspectiva de la investigación.
- **Síntesis de la información:** La información recolectada de la literatura científica, imágenes obtenidas de la zona de estudio y el conocimiento local se han sintetizado para formar una idea de la presencia y comportamiento de la procesionaria del pino en La Grajera. Esta síntesis ha ayudado a formular posibles estrategias de control específicas para este área de estudio.

2.3. Análisis cartográfico

A partir de la utilización de la herramienta gratuita GBIF se van a realizar los siguientes análisis:

- Inventariado de la especie afectada y la especie a controlar en La Grajera, La Rioja (**Figura 9**)
- Expansión de la procesionaria del pino en un intervalo de tiempo comprendido entre el año 1994 y 2022 (**Figura 12**).
- Inventariado de las aves que existen a día de hoy en la Grajera, La Rioja (**Figura 18**)

Es por ello que mediante la utilización de esta herramienta se va a poder analizar la presencia de estas especies en la zona estudiada y como consecuencia, la necesidad de proponer medidas de gestión para mantener controlada la procesionaria del pino.

Además, gracias al desarrollo de los mapas de expansión de *T.pityocampa*, se va a poder analizar cómo las temperaturas han tenido un impacto directo en la adaptación de la especie a áreas que previamente eran inaccesibles para ella.

Es por ello que la herramienta utilizada va a tener una relevancia para analizar qué aves están presentes a día de hoy en La Grajera, permitiendo así tomar decisiones para la reintroducción de aves que ayudarán a mantener un control efectivo de la procesionaria del pino.

Por último cabe destacar que la utilización de la base de datos Gbif proporcionará una aproximación real al estudio del avance de la procesionaria brindando así información útil para la toma de decisiones en la gestión y control de la especie estudiada.

2.4. Análisis de temperaturas

Para poder corroborar resultados como los mostrados en los mapas de expansión obtenidos de la página web gratuita Gbif.org y Gbif.es, se ha llevado a cabo una investigación de cómo las temperaturas han variado en el mismo día y hora entre el año 1994 y 2022. Para ello se han extraído mapas de temperatura de los años mencionados de la página Ventusky.com.

Además, se ha estudiado la afección de la temperatura en el ciclo vital de la especie y como esta ha sido un factor limitante en la expansión de la especie por Europa.

2.5. Técnicas empleadas para la gestión de la procesionaria del pino

Para poder comprender las técnicas para la gestión de plagas, se ha realizado un estudio exhaustivo de diferentes estudios científicos que hablaban de la utilización de diferentes medidas y su efectividad a partir de pruebas de campo. Esta información ha sido utilizada para posteriormente tomar decisiones referentes a la utilización de las distintas medidas aprendidas en la zona de estudio seleccionada.

3. Resultados

3.1. Expansión de *Thaumetopoea pityocampa* especie en España y Europa

Tras el análisis de la expansión y distribución de *T. pityocampa* en tres periodos de tiempo diferentes, se ha podido determinar que ha habido una evidente expansión en el tiempo de la procesionaria del pino por toda Europa. Por lo que tras las correspondientes evidencias, se podría confirmar una expansión paulatina de la especie por todo el continente debido al aumento de las temperaturas mínimas en Invierno, permitiendo una mayor adaptación de la especie a situaciones que previamente les impedían desarrollarse. Así mismo, la repoblación de especies aptas para el desarrollo de esta especie, entre las cuales destacamos la familia Pinaceae, principalmente del género *Pinus*, seguidas del género *Cedrus* ha promovido junto al aumento de las temperaturas una expansión hacia el Norte de Europa.

El análisis de la base de datos GBIF ha confirmado esta expansión inevitable de la procesionaria hacia áreas que antes superaban el umbral inferior de temperatura letal, pero que en la actualidad son más accesibles debido al cambio climático. Esto ha llevado a la destrucción de numerosas especies de la familia Pinaceae, principalmente *Pinus* y en menor medida *Cedrus*, lo que resulta en una pérdida de biodiversidad y un desequilibrio en la cadena trófica, generando un déficit ecosistémico. Las **Figuras 12A, 12B y 12C** muestran claramente cómo en los últimos 28 años la expansión de la procesionaria del

pino ha sido inminente en áreas previamente inaccesibles. Además, un análisis de registros históricos a partir de 1994 (Figura 11) revela un aumento constante en la expansión de la especie, coincidiendo con el incremento de las temperaturas mínimas invernales, respaldando así la evidencia de su propagación.



Figura 11. Histórico de registros de la *T.pityocampa* en Europa. (GBIF.org)

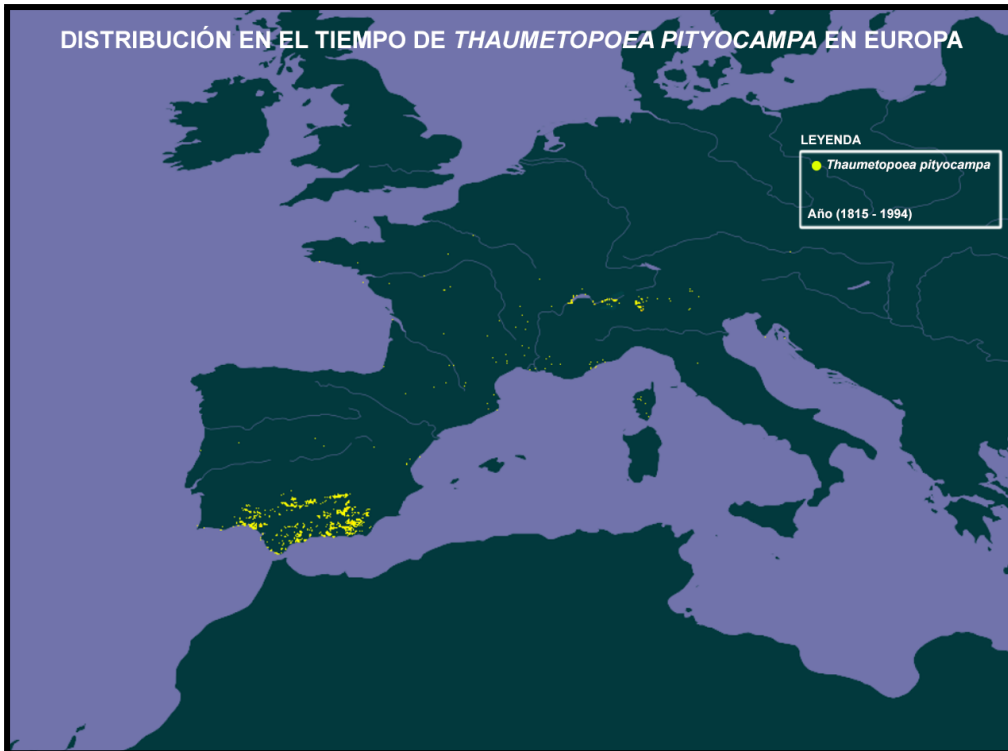


Figura 12A. Distribución espacial de *T. pityocampa* en el tiempo (1815- 1994) (GBIF.org, 2023)

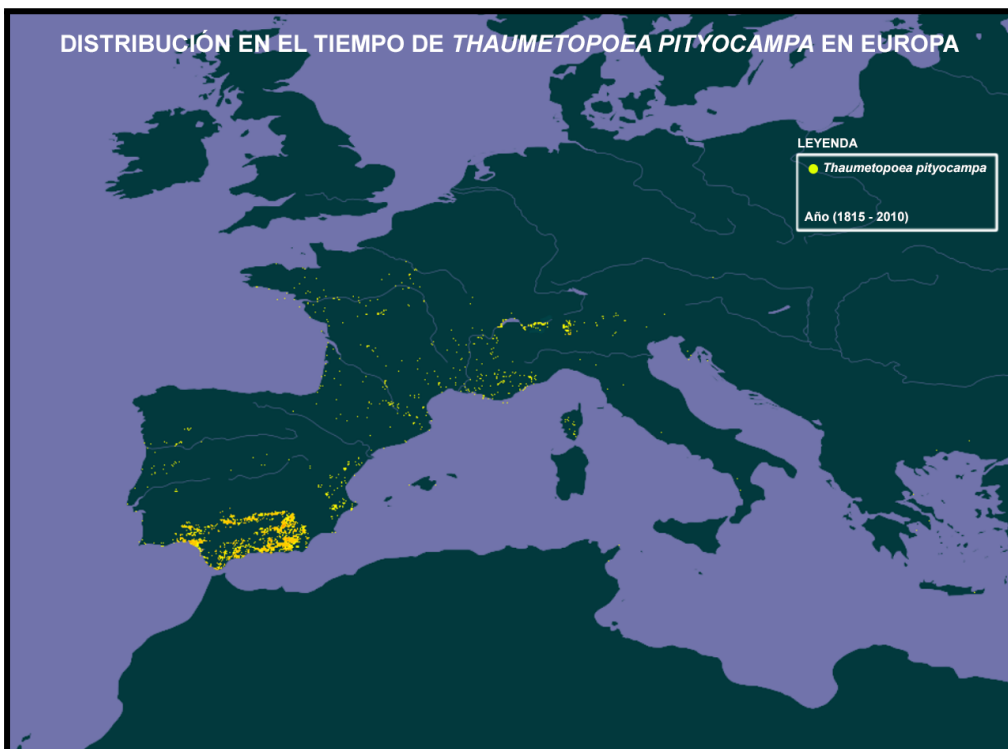


Figura 12B. Distribución espacial de *T. pityocampa* en el tiempo (1815- 2010) (GBIF.org, 2023)

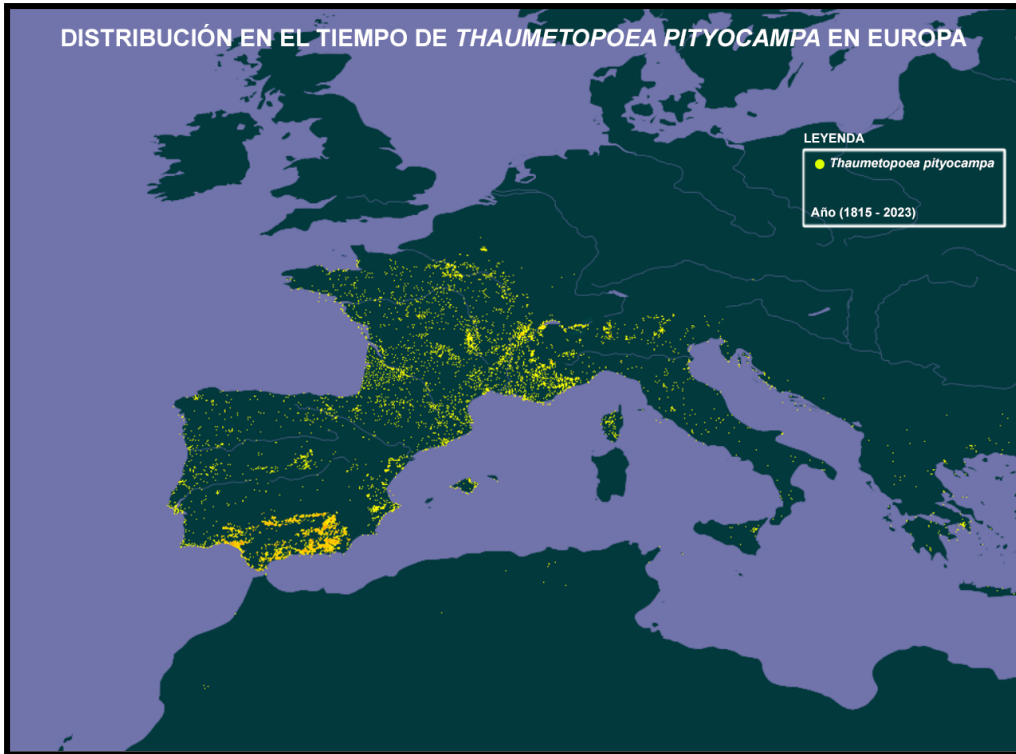


Figura 12C. Distribución espacial de *T. pityocampa* en el tiempo (1815- 2023) (GBIF.org, 2023)

Por último, es fundamental resaltar la relevancia de la relación existente entre las temperaturas y la expansión de una especie en el contexto europeo. A través de un análisis detenido, podemos identificar una clara y directa conexión entre estos dos parámetros. Al comparar la expansión de esta especie con el aumento paulatino de las temperaturas en Europa, se vuelve evidente que existe una correlación directa entre ambos fenómenos. Es por ello que, las condiciones climáticas ejercen una clara presión sobre la distribución geográfica de la especie en cuestión. Tal y como se puede observar en la **Figura 13**, en el mismo día en un intervalo de 26 años, se puede apreciar una variación en la temperatura de entre 3 y 4°C. De la misma manera, se ha llevado a cabo esa misma comprobación entre días diferentes para ver si esto ocurría, y efectivamente, las temperaturas eran relativamente más bajas en el año 1994. De esta forma, se ha podido confirmar que existía una relación directa entre la temperatura y la expansión de la especie.

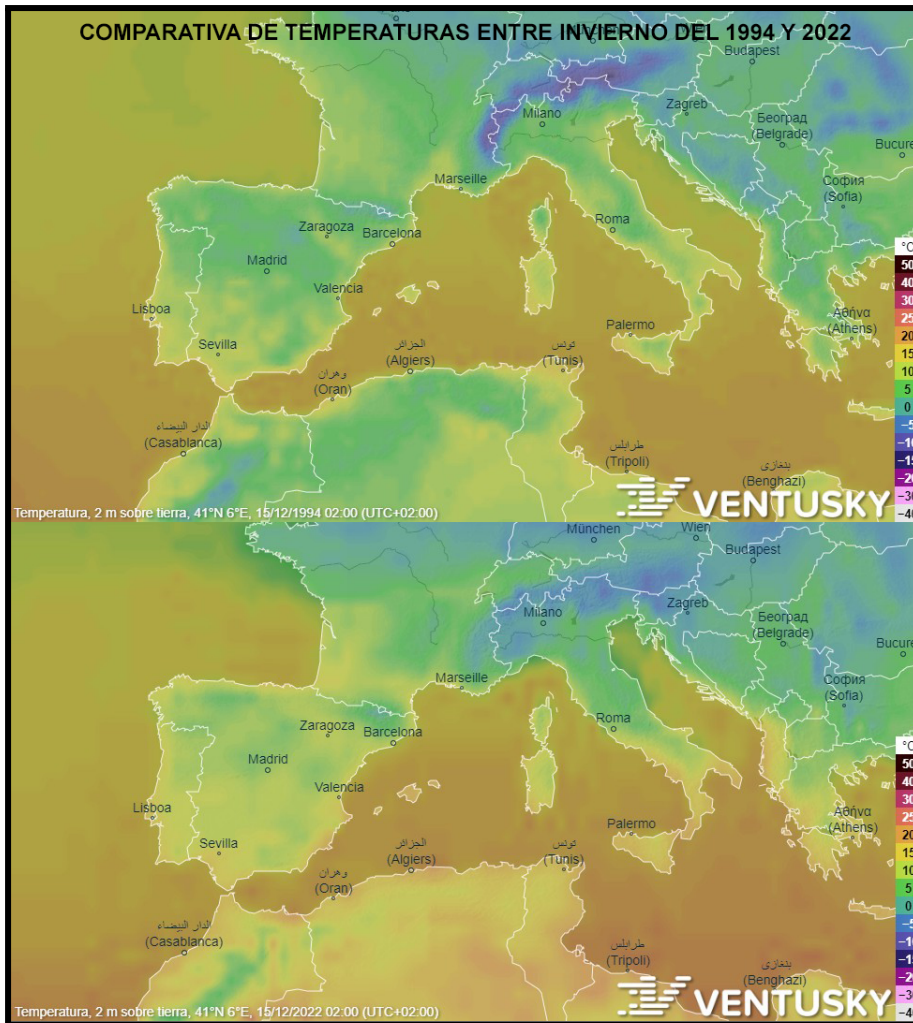


Figura 13. Variación de la temperatura en un rango de 28 años. (Ventusky.com)

3.2. Interacción de *Thaumetopoea pityocampa* con las temperaturas en un caso de estudio concreto

El desarrollo de las larvas en este área de estudio mostró una marcada tendencia "post-estival", buscando mitigar el impacto de las temperaturas elevadas, aunque los primeros estadios aún se vieron influenciados por máximas diurnas alrededor de los 30°C. Los estadios L1 y L2 se desarrollaron en condiciones de temperaturas máximas absolutas cercanas a 30°C y temperaturas medias de máximas superiores a 20°C. En consecuencia, los nidos cumplieron principalmente un propósito estructural y de cohesión de la colonia. Con estos umbrales térmicos, el crecimiento de las orugas fue relativamente rápido, completando ambos estadios en aproximadamente 30 días (López, 2014).

Cabe destacar que en el estudio realizado se observó una disminución en la población en la Sierra Calderona después del evento de "gota fría" en otoño del año 2000. El aguacero torrencial que generó alrededor de 250 L/m² en pocas horas arrancó colonias en el estadio L1 de las ramas de los pinos, dispersándose y causando la muerte de gran parte de ellas. La coincidencia de un factor de mortalidad aleatorio como la lluvia con un estadio más susceptible condujo a un episodio de mortalidad pasiva que prácticamente eliminó la plaga de los pinares en estudio.

En un contexto de una temperatura máxima promedio de alrededor de 15°C, las orugas en el estadio L3 (noviembre-diciembre) comenzaron a consolidar los nidos de seda. Sin embargo, a pesar de las temperaturas acumuladas (superiores a 25°C), los nidos aún no desempeñaban una función de termorregulación evidente, presentando una apariencia "descuidada".

Entre diciembre y febrero, las colonias en el estadio L4 tejieron nidos de invierno en respuesta al drástico descenso de las temperaturas, respaldando los resultados del análisis de regresión múltiple de las dimensiones de los nidos. El volumen de las estructuras de seda aumentó significativamente a partir de este estadio. Con temperaturas máximas y temperatura integrada por debajo de 20°C, y mínimas absolutas cercanas a cero, las orugas ralentizaron su desarrollo, como se refleja en la **Figura 14**.

El estadio L5, localizado entre febrero y marzo, se pudo identificar en el bosque durante aproximadamente 30 días. Las orugas en este estadio, con nidos de invierno bien estructurados (una temperatura integrada de alrededor de 30°C indicaría una termorregulación óptima dentro de las bolsas de seda) y expuestas a máximas promedio de alrededor de 25°C, demostraron una actividad trófica significativa, defoliando rápidamente gran parte de la copa en árboles jóvenes.

La fase pupal duró alrededor de 5 meses, desde febrero-marzo hasta mediados de agosto-septiembre, coincidiendo con la estación más seca y cálida del año.

En resumen, las temperaturas umbrales ejercen un impacto fundamental en los ciclos de vida y el comportamiento de estas especies en diferentes entornos. Pero por otro lado hay que tener en cuenta que la adaptación a las variaciones térmicas y la interacción con factores climáticos como la lluvia influyen en las etapas del desarrollo y la supervivencia de estas especies de lepidópteros. (López, 2014).

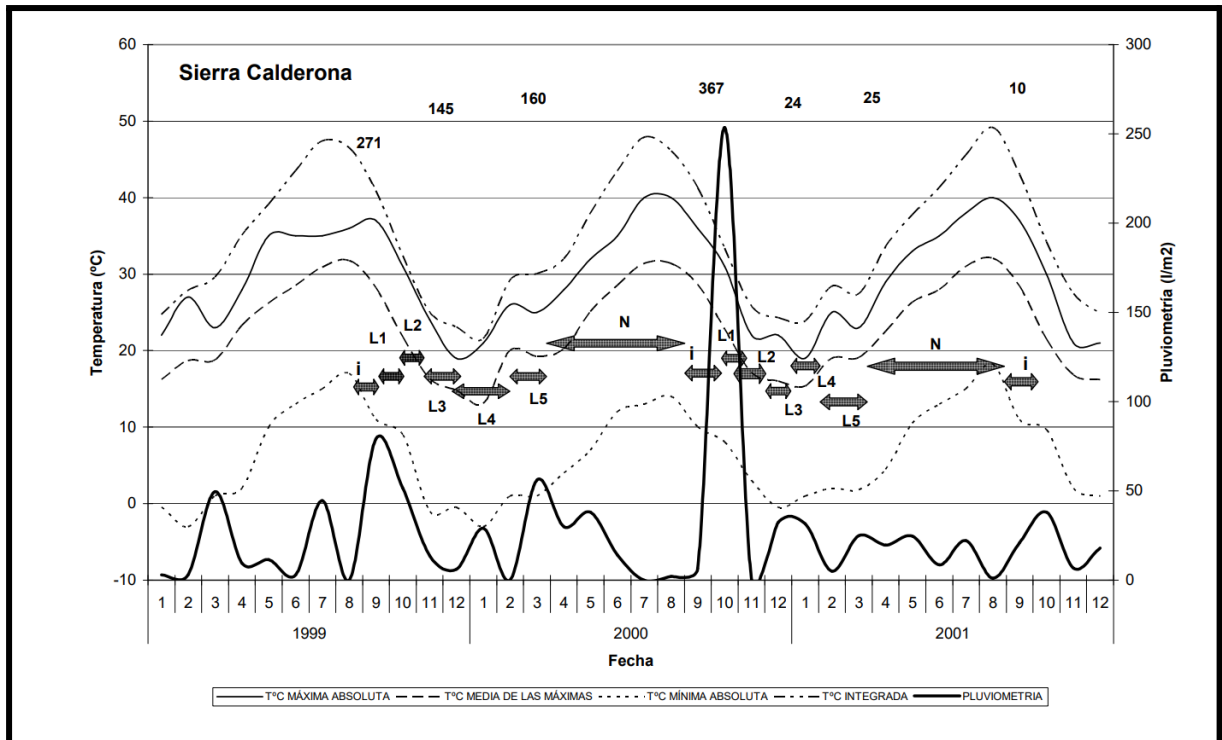


Figura 14. Fenología de *T. pityocampa*. Los valores numéricos en la parte superior indican la densidad de puestas de huevos por hectárea o de nidos de invierno por hectárea. Las fechas representan los diferentes estados de desarrollo larvario y su duración. "T°C integrada" se refiere a la temperatura media mensual acumulada. Los datos utilizados para construir el diagrama climático fueron recopilados del Centro Meteorológico "Agro" en Casinos para la Sierra Calderona y del Centro Meteorológico (López, 2014)

3.3. Efecto de la temperatura en la alimentación y su expansión debido al cambio climático

En el contexto del cambio climático y su impacto en las especies, se enfoca en el análisis de la temperatura letal inferior y la expansión geográfica de *T. pityocampa*, la procesionaria del pino. Se aborda cómo las temperaturas más cálidas han influido en la latitud y longitud de la distribución de la especie durante el invierno. A través de experimentos detallados que evalúan la temperatura invernal, la actividad de alimentación y la supervivencia de las larvas, se demostró que el aumento de las temperaturas invernales en las últimas tres décadas ha propiciado una expansión significativa de la especie (Battisti et al., 2005).

3.4. Temperatura mínima y máxima letal de *Thaumetopoea pityocampa*

Si bien se podría suponer, la procesionaria del pino no podría sobrevivir a los inviernos si no fuera gracias a los bolsones que estas fabrican durante sus 5 estados larvarios, ya que, esta especie no solo se desarrolla en lugares donde las temperaturas son suaves en invierno, si no que, localizaciones como la zona de estudio las temperaturas son cercanas o en ocasiones inferiores a la temperatura letal mínima, pero que, gracias a la termorregulación producida por los bolsones consiguen superar situaciones climatológicas desfavorables.

Los umbrales de temperatura letal para ellas se encuentran por encima de 30°C y por debajo de los -7°C para el individuo aislado sin ningún tipo de protección (Demolin, G., 1969; citado en Plagas y enfermedades forestales extremeñas).

3.5. Influencia de las Temperaturas Extremas y Umbrales de Alimentación en el Desarrollo de la Especie

Se ha observado que las colonias de procesionaria del pino presentaron un retraso en su desarrollo en sitios extremos de latitud o elevación, donde las temperaturas eran más frías. Además, la actividad de alimentación disminuyó progresivamente en estos lugares. La insolación también desempeñó un papel, elevando la temperatura del nido y estimulando la actividad de alimentación en el aspecto sur, pero no en el norte. En todos los sitios estudiados, se identificaron caídas prolongadas de la temperatura por debajo de los umbrales críticos de alimentación, lo que resultó en inanición y mortalidad parcial (Battisti et al., 2005). A pesar de esto, alrededor del 20% de las colonias lograron sobrevivir.

Los inviernos más cálidos generarán un incremento en las horas de alimentación, lo que reducirá la probabilidad de alcanzar la temperatura letal inferior. Esto, a su vez, contribuirá a una mayor expansión latitudinal y altitudinal de la especie, ya que se espera una mejora en la supervivencia en entornos previamente desfavorables.

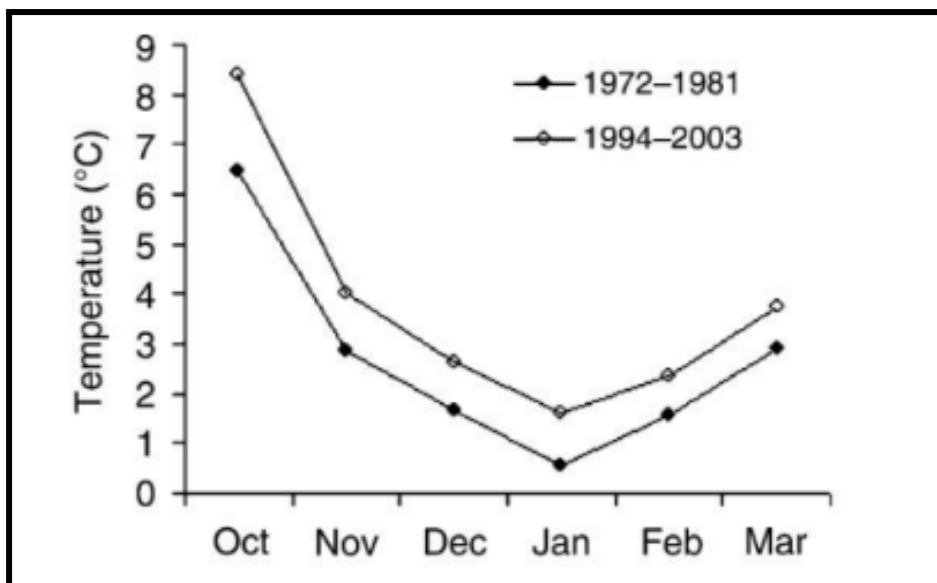


Figura 15. Aumento de la temperatura letal inferior de *Thaumetopoea pityocampa*, en dos intervalos de tiempo diferentes. Muestra una diferencia global en la temperatura mínima media invernal entre los dos periodos de 1,1°C. Estos datos se basan en estaciones meteorológicas de Orleans (Meteo France) (Battisti et al., 2005)

Los experimentos de laboratorio confirmaron que existen umbrales de temperatura para la actividad invernal de las larvas tanto con respecto a la inducción de la alimentación como a la alimentación nocturna real. Una temperatura del nido superior a 6°C fue necesaria para inducir la alimentación durante la noche siguiente, por lo que si no se cumplía esta condición, las larvas no se alimentaban aunque las condiciones de alimentación nocturna fueran favorables. La magnitud de la inducción varía con la temperatura del día; las larvas se alimentaron significativamente más cuando el nido alcanzó temperaturas diurnas más altas. Por la noche se observó que solo se alimentaban cuando la temperatura en el aire era superior a 0°C, tampoco se produjeron heces cuando la temperatura nocturna fue de 3°C. La alimentación diurna fue escasa y limitada a las primeras horas (9:30 - 11:00); las larvas no se alimentaron durante la noche debido a la baja temperatura (Battisti et al., 2005).

3.6. Adaptación de *Thaumetopoea pityocampa* al calentamiento global y su adaptación

El impacto del calentamiento global en las especies vivas ha sido ampliamente reconocido, afectando desde especies individuales hasta comunidades enteras. Los cambios en el rango de distribución relacionados con la temperatura, como se ha observado en plantas, aves y mariposas, a menudo se vinculan a limitaciones fisiológicas.

Los insectos fitófagos, en particular, han demostrado ser sensibles a las fluctuaciones térmicas, lo que puede afectar directamente su desarrollo, fenología y supervivencia. Sin embargo, estos insectos también tienen la capacidad de adaptarse a nuevos entornos, siempre que encuentren sus plantas hospedantes disponibles.

En el caso específico de *T. pityocampa*, la polilla de la procesionaria del pino, se ha comprobado cómo el calentamiento invernal ha reducido la influencia limitante de la temperatura (Battisti et al., 2005). Esta especie es un ejemplo clásico de un insecto invernal, con su actividad centrada en las larvas en los estadios tercero y cuarto. Su rango de distribución se ha expandido en las últimas décadas debido a las condiciones invernales más cálidas, lo que ha llevado a su colonización en áreas anteriormente inaccesibles. En un estudio que aborda el rendimiento larval, se exploraron gradientes naturales de temperatura en dos áreas de expansión:

- Latitudinal (en la región central de Francia)
- Altitudinal (en el norte de Italia).

Mediante la crianza de cohortes de larvas en diferentes zonas, se analizaron analogías espaciales para comprender cómo el cambio climático puede influir en la expansión del rango de *T. pityocampa*. Las áreas de expansión reciente mostraron que las condiciones climáticas más cálidas contribuyeron a su establecimiento en nuevas regiones (Battisti et al., 2005).

3.7. Técnicas empleadas en el área de estudio

La procesionaria lleva vigente en el parque de La Grajera más de dos décadas, siendo multitud de mascotas y seres humanos los afectados por esta plaga, por lo que se ha mantenido una lucha constante contra esta especie. Años atrás, tal y como se puede leer en periódicos Riojanos como el periódico virtual de La Rioja, anteriormente se utilizaban métodos más enfocados en fitosanitarios de origen sintético, lo cual significaba que se producía un residuo que afectaba directamente sobre el ecosistema utilizado, además de ser un método más agresivo para las especies vegetales y los seres humanos en general. Hoy en día, los métodos han evolucionado a métodos mucho más sostenibles con “residuo cero”, pero tal y como se puede seguir observando, no se ha eliminado por completo el uso de métodos químicos. A pesar de este cambio favorable para el medio ambiente, en casos extremos de plaga, se sigue optando por el método químico (Ruiz, 2018). Los dos principales métodos que se están llevando a cabo en La Grajera es la colocación de anillos mecánicos con bolsas de tierra que evitan que estas bajen hasta el suelo produciendo las tan conocidas procesiones, de esta forma, se pueden capturar y

evitar que proliferen hasta las siguientes generaciones. Por otro lado, y un poco contradictorio a lo que el autor del artículo indica, el otro método que utilizan es la remoción de los bolsones de las copas de los árboles. El método que utilizan es disparar perdigones que impactan contra los nidos y estos perdigones al contener un insecticida elimina parcialmente o por completo las orugas del interior de los mismos y posteriormente son eliminados de las copas de los árboles mediante el uso de pértigas. Es importante resaltar que, hoy en día, tenemos que poner esfuerzos mayores en evitar la utilización de medidas poco sostenibles, por lo que el principal objetivo de este proyecto es proponer medidas preventivas y de control que sean totalmente sostenible y efectivas para la zona de estudio.

3.8. Estrategias de control de plagas existentes

T. pityocampa es una de las plagas forestales más importantes. La defoliación larvaria da como resultado la disminución del incremento anual del diámetro de los árboles hospedantes. Se ha informado que la disminución del diámetro es del 12% al 65% (Huseyin et al., 2010). Además, los árboles deshojados pueden volverse muy propensos a la incidencia de insectos secundarios. Estos insectos pueden causar la mortalidad de los árboles (Huseyin et al., 2010). Por tanto, la protección de los bosques de coníferas requiere la aplicación regular de varios métodos de control contra la procesionaria del pino. Los métodos de control involucran medidas mecánicas-físicas, químicas, biotécnicas y biológicas para el manejo de *T.pityocampa*. En cuanto al control (Huseyin et al., 2010), las medidas basadas principalmente en la destrucción de lotes de huevos y nidos de invierno, utilizando diversos productos químicos, trampas de feromonas, aceites vegetales, hongos entomopatógenos, parasitoides - depredadores, y patógenos microbianos en Turquía hasta el momento. También existen limitaciones considerables en los métodos de control ampliamente utilizados en Turquía (Huseyin et al., 2010).

3.8.1. Control químico mediante insecticidas

Las aplicaciones basadas en preparados químicos afectan negativamente al medio ambiente y los enemigos naturales de las plagas son susceptibles a estos tratamientos. Además, Kanat y Sivrikaya (2004) informaron sobre la necesidad de que los científicos exploren y se concentren en métodos biológicos alternativos debido a que los niveles de población de procesionaria del pino aumentaron rápidamente en el año posterior a la aplicación del químico.

3.8.2. Control biológico- químico mediante el uso de *Bacillus Thuringiensis*

Se han realizado algunos estudios y experimentos para evaluar la eficacia de las preparaciones de *Bacillus thuringiensis* (BTK) contra la procesionaria del pino mediante fumigación terrestre en Turquía. Ozcankaya y Can (2004) obtuvieron varios resultados de tratamientos con diferentes preparados comerciales, entre ellos Btk, en Mugla. Orkazanc (1986) probó diferentes pesticidas a diferentes proporciones, incluidas las formulaciones Btk mediante la fumigación de plantaciones de pino en Kilis-Hazaltepe. A pesar de su eficacia y perfil ambientalmente amigable, el uso de Btk no ha sido uno de los agentes de control de *T.pityocampa* en Turquía mientras que es el método más utilizado de control de en la UE y en algunos países mediterráneos (Huseyin et al., 2010). Además, las preparaciones de BTK utilizadas contra especies de mosquitos muestran resultados significativos para el control.

Efectividad y funcionamiento

En el estudio que realizó Huseyin (2010) se utilizaron dos formulaciones de BTK diferentes para verificar la efectividad en el *T.pityocampa* de su estudio; (1) Foray 76B que tiene una potencia de 16.700 UI por mg es una formulación a base de agua, (2) VBC 60074 que tiene una potencia de 64 BIU por kg es una formulación de gránulos humectables. Ambos bioinsecticidas contienen las esporas y cristales de BTK. La prueba de campo se organizó mediante un diseño de bloques aleatorios de dos factores dentro de tres bloques con un tamaño de 15ha. Cada bloque se subdivide en tres parcelas con un tamaño de 5 ha. Luego se establecieron las zonas de amortiguamiento para evitar la contaminación cruzada de los tratamientos entre los bloques y las parcelas (**Tabla 6**).

Foray 76B fue aplicado a razón de 2,5 litros 50 BIU⁻¹ ha⁻¹ en tres parcelas. Se aplicó VBC 60074 a razón de 0,6625 kg + 2,5 litros de agua 50 BIUha⁻¹ en tres parcelas. Los bioinsecticidas fueron rociados a 16°C y a una velocidad del viento de 3 km/h y en condiciones de clima parcialmente nublado el 21 de Diciembre del 2005. La aeronave está equipada con 4 atomizadores rotativos Micronair AU 4000. Durante la operación de fumigación, la aeronave voló entre 5 y 7 metros por encima del dosel del bosque.

Después de la aplicación del 21 de Diciembre del 2005, se recolectaron veinticinco nidos de cada parcela el 19 de Enero del 2006 (P1), 09 de Febrero del 2006 (P2) y 03 de Marzo del 2006 (P3). De forma que se determinó el número de larvas vivas y muertas de los nidos recolectados. En total se recolectaron 675 nidos en brotes durante P1, P2 y P3

(Tabla 6). Por tanto, para calcular el porcentaje de mortalidad de larvas, el número de larvas muertas se dividió por el número de larvas muertas y vivas para cada nido.

Resultados del estudio

Las tasas de mortalidad obtenidas en las parcelas de tratamiento fueron significativamente mayores que la tasa de mortalidad en las parcelas de control (Huseyin et al., 2010).

Tabla 6. Mortalidad (%) de las larvas por cada parcela (Huseyin et al., 2010).

Periodos aplicación		Parcelas de control			Parcelas de incursión 76B			VBC 60074 parcelas		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
1º	P1	1,33	0,90	0,66	98,23	96,65	97,71	97,43	97,17	97,29
1º	P2	0,48	0,45	0,37	99,88	99,62	99,96	99,11	99,94	99,93
1º	P3	2,95	3,66	2,81	99,18	98,85	99,77	99,06	99,64	99,45

Las parcelas que fueron tratadas con VBC 60074 no mostraron diferencias estadísticamente significativas. Por otro lado, se observó un contraste leve pero estadísticamente significativo en los efectos de Foray 76B en el porcentaje de mortalidad de larvas entre los períodos P2 y P3 períodos. Aunque este contraste no fue estadísticamente significativo a un nivel de $p < 0,05$, se indicó que VBC 60074 tenía una dosis residual ligeramente más duradera que la preparación Foray 76B en las agujas de los pinos (Huseyin et al., 2010)

Ambos bioinsecticidas dieron resultados aceptables, en cuanto a la mortalidad de las larvas, a los 28 días de dispersión (Huseyin et al., 2010). Además, estos resultados fueron similares a los resultados de otros autores que estudiaron sobre los productos a base de *Bacillus thuringiensis*.

En las parcelas de control, el promedio de los valores porcentuales de mortalidad mostró un ligero aumento a lo largo de los periodos de la encuesta, aunque permaneciendo significativamente más bajo que la tasa de mortalidad en el tratamiento de las parcelas. Estas diferencias de mortalidad entre P1, P2 y P3 dentro de la parcela de control se puede atribuir al efecto de parásitos, depredadores, patógenos y otros factores ambientales.

Los resultados de mortalidad obtenidos en la parcela de control revelaron que el biótico y los factores abióticos no fueron favorables al control natural de la oruga de PPM en la zona.

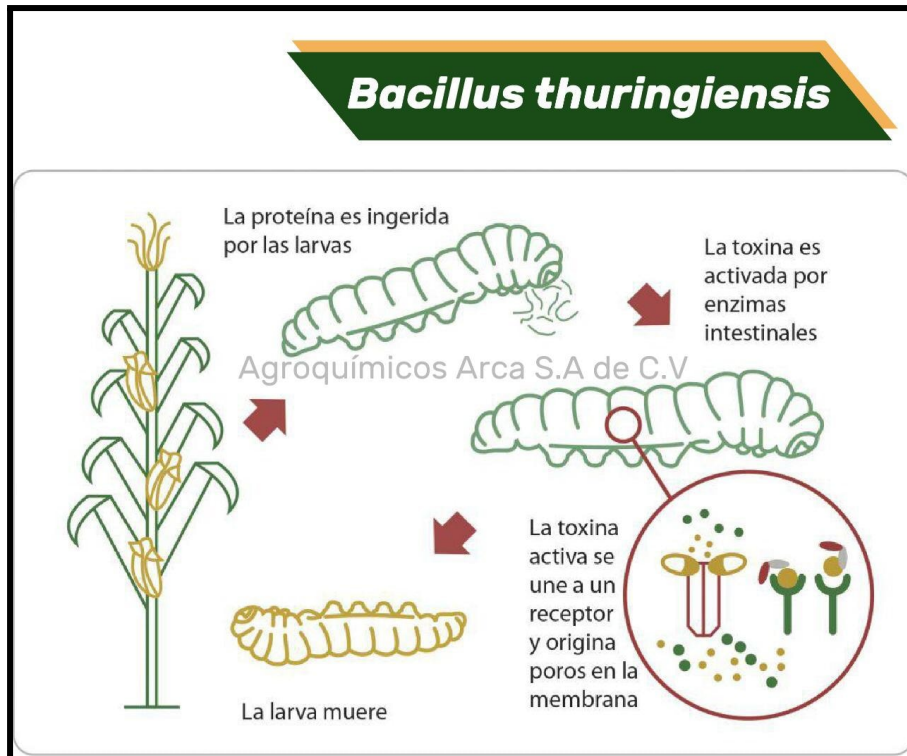


Figura 16. Esta bacteria produce una toxina que perfora el tracto digestivo de los insectos. Dicha toxina es inocua para el humano, ya que se activa únicamente con las condiciones de pH alcalino que existen en el estómago de los insectos. (Agroquímicos Arca S.A de C.V., 2021)

3.8.3. Control mecánico mediante Anillos

El uso de este método de control físico-químico en la naturaleza presenta dificultades ya que tiene un elevado costo además de que genera riesgos para la salud asociados a los pelos urticantes de *T.pityocampa* (Huseyin et al., 2010) que causan pústulas y heridas en la mucosa oral y nasal de los humanos limitando seriamente la medida en que la remoción mecánica de los nidos, que requiere mucha mano de obra, puede usarse como método de control (Huseyin et al., 2010). A pesar de los problemas generados por esta medida en casos de alta infestación de procesionaria del pino, esta medida es una buena opción como medida complementaria a otras que actúen de forma efectiva. En casos de una plaga controlada, la utilización de anillos tendrá un carácter más efectivo para controlar vestigios de procesionaria del pino en caso de que las medidas previas aplicadas estén actuando como método de control efectivo. Esto es debido a que en casos controlados, no será peligrosa para los humanos la recogida de anillos de áreas afectadas.



Figura 17. Anillo mecánico saturado de procesionaria del pino (OpenNatur.com)

3.8.4. Confusión sexual con feromonas

La técnica de confusión sexual o interrupción de la cópula ha demostrado ser altamente eficaz en la protección contra varios tipos de polillas. Aunque su aplicación se ha centrado principalmente en la agricultura, con un enfoque más limitado en el ámbito forestal (Hiernaux y Hurtado, 2022), se han logrado resultados exitosos en el control de plagas significativas, como la polilla de la vid (*Lobesia botrana*) y la carpocapsa de los árboles frutales (*Cydia pomonella*) (Hiernaux y Hurtado, 2022).

En lo que respecta al contexto forestal, la información disponible es menos abundante, aunque se ha demostrado su eficacia en especies como *Lymantria dispar* y *Orgyia pseudotsugata* (Hiernaux y Hurtado, 2022). Los primeros experimentos relacionados con la procesionaria del pino se llevaron a cabo hace aproximadamente dos décadas (Hiernaux y Hurtado, 2022). Además, se ha observado su éxito en áreas recreativas de Italia y Grecia, según el mismo estudio. Estos casos de aplicación exitosa se basan en la utilización de una pasta de feromonas en ramas y troncos para controlar la población de la procesionaria del pino.

Es relevante tener en cuenta que esta técnica presenta algunos desafíos. En primer lugar, su aplicación tiene un alcance limitado, lo que significa que puede no ser tan efectiva en áreas extensas o densamente pobladas de procesionaria. Además, su uso puede ser inconveniente en áreas con un alto tráfico de personas, como las áreas recreativas públicas, donde la seguridad y la comodidad de los visitantes deben ser consideradas.

La liberación de la feromona sexual se lleva a cabo mediante el uso de un gel microencapsulado, conocido como Pine T pro ball y comercializado en España por Blue Heron Plant BioDynamics. Este gel se aplica en la parte superior de los árboles utilizando una marcadora de aire comprimido similar a las utilizadas en el juego de "Paintball".

El proceso de microencapsulación implica la inclusión de la feromona en una matriz o sistema de pared para regular su liberación de manera precisa y controlada, garantizando así su biodisponibilidad. Cada bola contiene 0,1 gramos de una suspensión altamente concentrada de feromona y está fabricada con una carcasa de origen vegetal completamente biodegradable. Este producto libera gradualmente la feromona de manera efectiva durante un período de 120 días.

La aplicación se realiza preferentemente desde una altura de al menos 6 metros, lo que permite que las bolas impacten de manera uniforme en el tronco y la copa del árbol, impregnándolo de manera efectiva. Este método de aplicación se considera innovador, práctico y de fácil uso, siendo adecuado para diversas situaciones y tipos de terreno. Además, permite ajustar la dosis según las necesidades específicas de cada caso.

Para maximizar la eficacia de la técnica de confusión sexual, se deben considerar las curvas de vuelo del insecto obtenidas durante la primera campaña del 2020. En consecuencia, en 2021 la aplicación se retrasó aproximadamente 15 días con respecto al año anterior y se llevó a cabo durante los días 28 y 29 de junio.

Se recomienda seguir un plan de aplicación que adapte el número de bolas por hectárea a la superficie a proteger, teniendo en cuenta la estructura de cada masa de pinar, su configuración y el nivel de infestación. Además, es aconsejable aplicar las bolas en las caras de los árboles orientadas al sur, ya que son las preferidas para la puesta de las mariposas (Hiernaux y Hurtado, 2022). También es importante prestar atención a los bordes de la parcela y dar énfasis a los árboles más altos o aislados (Hiernaux y Hurtado, 2022).

La presión de plaga se considera baja o moderada hasta 10 bolsones por árbol. Para zonas forestales y a partir de 0,5 hectáreas, se debe seguir la siguiente tabla de referencia (según el fabricante), teniendo en cuenta que la dosis máxima autorizada por hectárea es de 400 bolas. (**Tabla 7**).

Tabla 7. Dosis de aplicación en función de la superficie y el grado de infestación (Hiernaux y Hurtado, 2022)

Dosis de aplicación										
Área de la parcela (Ha)	0,5	1	2	4	10	25	50	100	200	400
Nº bolsas / Ha (niveles altos de infestación)	550	290	220	160	110	70	50	35	25	20
Nº bolsas / Ha (niveles bajos de infestación)	365	180	135	100	70	45	30	25	15	10

El tratamiento aplicado en la Casa de Campo demostró su eficacia al reducir las bolsas de insectos en áreas tratadas con la dosis máxima recomendada, aunque esta eficacia disminuyó en zonas más pequeñas. Sin embargo, en áreas tratadas con la dosis mínima sugerida por el fabricante, se observó un efecto contrario, posiblemente debido a una subestimación inicial de la infestación o una dosis insuficiente. Esto plantea la necesidad de reevaluar las dosis para entornos forestales, proponiendo incrementarse sustancialmente. Se subraya la influencia del borde del área tratada, aspecto descuidado en el diseño, al priorizar características de las masas forestales. La estrategia de confusión sexual es vista como una opción ecológica, pero se destaca la importancia de más ensayos para determinar las dosis eficaces, en línea con hallazgos franceses y resaltando la relevancia del tamaño de la parcela y la dosis en la eficacia del tratamiento (Hiernaux y Hurtado, 2022)

3.8.5. Captura masiva con feromonas

Las trampas de feromonas que se utilizan para el seguimiento de poblaciones de Proceionaria del pino se consideran una medida de control insuficiente cuando se aplican solas contra la plaga en zonas insuficientes cuando se aplican solas contra la plaga en zonas infectadas. Kucukosmanoglu y Arslangundogdu (2002) probaron diferentes tipos de trampas de feromonas durante 1993 en Turquía. El número medio de *T.pityocampa* capturado por trampa fue de 100 durante dos semanas. Si se supone que los lotes de huevos contienen alrededor de 270 huevos, la recolección de un lote de huevos equivale a casi la actividad de tres trampas. Por lo tanto, este método de control se combina con los demás con fines de asistencia.

Aunque algunos de los métodos biológicos, como los aceites vegetales, los hongos entomopatógenos y los depredadores de parasitoides, dieron resultados notables según las activaciones contra plagas en el laboratorio. Desde el uso de las preparaciones Btk durante 40 años, cuentan con la aceptación para tratamientos de campo y laboratorio por parte de organismo internacionales. (OMS, 1999, citado en en Huseyin et al., 357)



Figura 18. Método de captura con feromonas en La Grajera

3.8.6. Aves insectívoras

Las aves insectívoras son cada vez más reconocidas como agentes potencialmente eficientes que contribuyen al control biológico de plagas de insectos agrícolas y forestales en todo el mundo (Barbaro et al., 2010). En consecuencia, las comunidades de aves proporcionan servicios ecosistémicos que pueden ser de alto valor económico (Barbaro et al., 2010), especialmente en el contexto del calentamiento climático, que se espera que aumente los rangos de distribución y los brotes de plagas de insectos en el futuro. Sin embargo, es probable que el impacto de la depredación de aves sobre las plagas de insectos sea perceptible sólo en condiciones sin brotes, es decir, cuando las poblaciones de insectos plagas son bajas (Barbaro et al., 2010).

Las aves insectívoras han demostrado ser depredadores muy eficientes capaces de reducir entre un 20% y un 100% las poblaciones de lepidópteros.

La procesionaria del pino *T. pityocampa* está mostrando actualmente una expansión hacia el norte y una mayor altitud en Europa debido al aumento de las temperaturas invernales (Barbaro et al., 2010).

Sus enemigos naturales son muchos e incluyen aves depredadoras (Barbaro et al., 2010), aunque los pelos urticantes parecen ser un fuerte elemento disuasivo. Además las larvas de esta especie se entierran en el suelo a finales del invierno para pupar, lo que les permite escapar de un periodo de intensa depredación en primavera, durante la

temporada de reproducción de las aves (Barbaro et al., 2010). Por tanto, un brote de *T. pityocampa* puede tener un efecto negativo general en las comunidades de aves del bosque al reducir otros insectos sabrosos mediante una defoliación severa.

Las aves que han desarrollado estrategias de alimentación es romper las orugas golpeándose contra las ramas para descartar la cápsula de la cabeza y el tegumento, y comer solo las vísceras (Barbaro et al., 2010).

Sólo unas pocas especies de aves insectívoras han desarrollado adaptaciones para alimentarse de *T. pityocampa*, que muestra rasgos que aparentemente protegen de la depredación de las aves: la hembra cubre los huevos con escamas, las larvas se esconden en nidos de invierno durante el día y se cubren con pelos urticantes. en las etapas del estadio tardío y las pupas se entierran en el suelo (Barbaro et al., 2010).

Se han citado al menos siete especies de aves insectívoras como depredadores habituales de la procesionaria del pino en toda su área de distribución: cuatro grandes migrantes no passeriformes con una dieta especializada y tres pequeños passeriformes residentes con una dieta más generalista.

Tabla 8. Listado de especies potenciales para la depredación de *T. pityocampa* (Barbaro et al., 2010)

Nombre común	Nombre científico	Interacción con <i>T.pityocampa</i>	Estrategia de depredación
Carbonero común	<i>Parus major</i>	Consume larvas, huevos e imagos de estadio tardío.(González Cano, 1981; Halperin, 1990; Pimentel y Nilsson, 2007, 2009; citados en Barbaro et al., 2010, 109). Alimenta principalmente a sus polluelos con larvas de lepidópteros, especialmente geometridae y torricidos.	Hacen agujeros en los nidos y remueven la cápsula de la cabeza y la mayor parte del tegumento que lleva pelos urticantes para comer solo partes internas del cuerpo larvario (González Canó, 1981; Halperín, 1990; citados en Barbaro et al., 2010, p111). En España, se reveló que los estómagos contenían entre un 60-90% de restos de larvas de <i>T.pityocampa</i> (González Canó; 1981; citado en Barbaro et al., 2010, p111)
Cuco moteado	<i>Clamator glandarius</i>	Larvas de lepidópteros y especialmente especies urticantes como <i>T.pityocampa</i> durante las procesiones (Gil-Lletget, 1945; Valverde, 1953; Meise y Schiffer, 1972; Khoptynskii, 1976; Payne, 1997; Hoyas y López, 1998; citados en Barbaro et al., 2010, p109)	Estructura de pared de molleja suave que permite regurgitar pelos urticantes, además de descargar el tegumento urticante de las larvas (Meise y Schiffer, 1972; Gill, 1980; Payne, 1997; Gonzalez Cano, 1981; Halperín, 1990, Parry et al., 1997; citados en Barbaro et al., 2010, p109)
Cuco común	<i>Cuculus canorus</i>	Larvas de lepidópteros y especialmente especies urticantes como <i>T.pityocampa</i> durante las procesiones.	Estructura de pared de molleja suave que permite regurgitar pelos urticantes, además de descargar el tegumento urticante de las larvas.
Herrerillo crestado	<i>Lophophanes cristatus</i>	Se alimentan de huevos y larvas en estadio temprano (González Cano, 1981; citado en Barbaro et al., 2010, p109).	Depredación desplazada de los individuos no urticantes, en este caso las polillas, huevos o larvas en estado temprano (No han desarrollado los pelos urticantes aún) (Gonzalez Cano, 1981; Cleere; 1999; Sierro et al., 2001; Pimentel y Nilsson, 2007; citados en Barbaro et al., 2010, p109)
Herrerillo carbonero	<i>Periparus ater</i>	Se alimentan de huevos y larvas en estadio temprano.	Depredación desplazada de los individuos no urticantes, en este caso las polillas, huevos o larvas en estado temprano (No han desarrollado los pelos urticantes aún)
Abubilla euroasiática	<i>Upupa epops</i>	Se especializa en pupas de <i>T.pityocampa</i> durante su reproducción en primavera y principios de verano. (Battisti et al., 2000; Bárbaro et al., 2008; citados en Barbaro et al., 2010, p109)	Estructura de pico largo y curvo que se utiliza para excavar pupas enterradas. Rompen los capullos de las pupas con el pico (Battisti et al., 2000; Barbaro et al., 2008; citados en Barbaro et al., 2010, p109)
Chotacabras europeo	<i>Caprimulgus europaeus</i>	Su dieta se basa en polillas adultas en verano, podría alimentarse de <i>T.pityocampa</i> durante la emergencia del verano.(Auclair, 1988; Cleere, 1999; Sierro et al., 2001; citados en Barbaro et al., 2010, p109)	Depredación desplazada de los individuos no urticantes, en este caso las polillas, huevos o larvas en estado temprano (No han desarrollado los pelos urticantes aún)(Gonzalez Cano, 1981; Cleere; 1999; Sierro et al., 2001; Pimentel y Nilsson, 2007; citados en Barbaro et al., 2010, p109)

Tabla 9. Respuesta funcional de las especies estudiadas ante la especie de *Thaumetopoea pityocampa*.

Nombre común	Nombre científico	Respuesta funcional
Carbonero común	<i>Parus major</i>	Entre un 60 y un 90% de los estamos contenían procesionaria del pino (Gonzalez Cano (1981), Pimentel and Nilsson (2007, 2009); citados en Bárbaro et al., 2010, p109)
Cuco moteado	<i>Clamator glandarius</i>	100% de los estómagos contenían procesionaria del pino (Valverde (1971), Hoyas and López (1998); citados en Bárbaro et al., 2010, p109)
Cuco común	<i>Cuculus canorus</i>	Larvas de Lepidoptera son el 75% de la dieta (Gill (1980), Gonzalez Cano (1981); citados en Barbaro et al., 2010, p109)
Herrerillo crestado	<i>Lophophanes cristatus</i>	Entre un 60 y un 90% de los estamos contenían procesionaria del pino (Gonzalez Cano (1981); citado en Bárbaro et al., 2010, p109)
Herrerillo carbonero	<i>Periparus ater</i>	60% del contenido de los estómagos contenían procesionaria del pino (Gonzalez Cano (1981); citado en Bárbaro et al., 2010, p109)
Abubilla euroasiática	<i>Upupa epops</i>	70% de pupas de la procesionaria depredada (Battisti et al. (2000), Barbaro et al. (2008); citados en Bárbaro et al., 2010, p109)
Chotacabras europeo	<i>Caprimulgus europaeus</i>	Las polillas componen entre un 80-90% de su dieta (Sierro et al. (2001), Barbaro et al. (2003); citados en Bárbaro et al., 2010, p109)

Por tanto, el efecto de la depredación por parte de estas especies puede ser complementario en el tiempo y el espacio debido a distintos métodos y periodos de alimentación (Barbaro et al., 2010), permitiendo una sucesión temporal de depredación cubriendo el ciclo de vida completo de la presa; huevos, larvas de estadio temprano y tardío (dentro de los nidos invernales o durante procesiones), pupas, e imagos.

3.9. Desarrollo de nuevas estrategias de control específicas

Como propuesta final, teniendo en cuenta las medidas propuestas en función de las medidas ya conocidas y de forma complementaria a estas para lograr un control más sostenible sería la realización de mapas cartográficos mediante la utilización de drones. Para este caso concreto habrá que tener en cuenta diferentes aspectos en cuanto a la selección de drones y el tipo de cámara que será utilizada para poder muestrear de forma satisfactoria los bolsones del lepidóptero en cuestión.

Adquisición de datos:

- **Selección del dron:** Para esta tarea habrá que tener en cuenta la distancia en la que nos vamos a mover (Para la zona de estudio concreta, La Grajera tiene una

extensión aproximada de 32 hectáreas), la autonomía, calidad de cámara, entre otras. Para este caso se podría utilizar el siguiente dron:

- **DJI Phantom 4 RTK:** A pesar de que existen alternativas mucho más caras, para este proyecto en concreto seleccionaremos una opción relativamente económica, pero no lo suficiente como para que tenga una vida útil mayor. Este dron está especialmente diseñado para la cartografía, por lo que se podrá utilizar en otros sectores como el cultivo de la viña, ya que al ser una zona especializada en cultivo de de la viña, se le podría dar otros usos como el estudio de la calidad de los suelos, humedad, salud de las viñas, temperatura, altitud, entre otras. El precio oscila entre 4000 y 6000 euros (DJI, 2023)



Figura 19. Dron DJI Phantom 4 RTK (enterprise.dji.com)

- **Planificación de la tarea:** Habrá que planificar la ruta específica de vuelo del dron, asegurándose de cubrir toda la zona afectada, en este caso son 32 hectáreas, pero no está toda la zona cubierta de la especie afectada, por lo que no sería necesario cubrirla por completo.
- **Sensores:** Para este caso en concreto, habría que utilizar sensores específicos que pudiera detectar los nidos, en este caso, se podría utilizar lo siguiente:
 - Como los nidos son blancos en etapas avanzada de la procesionaria se va a poder utilizar, por ejemplo, una cámara RGB de alta resolución con capacidad para capturar imágenes en blanco y negro. Este tipo de cámaras son cámaras convencionales que capturan información en tres canales de color: rojo, verde y azul. Para detectar objetos de color blanco sobre un fondo de pinos, se puede utilizar el canal de luminancia (Y) de una imagen en blanco y negro, que se obtiene al combinar los tres canales de color (En este caso concreto, el dron seleccionado cuenta con una cámara RGB integrada diseñada para aplicaciones de cartografía y topografía de alta precisión) (Smith, 2021)

- Como es una zona relativamente pequeña y no será necesario un control constante de la evolución de los nidos, no será necesario la utilización de algoritmos que entrenen al dron para poder reconocer los nidos, ya que además esto, supondrá un coste mayor en la tarea de reconocimiento.
- **Procesamiento de imágenes:** Tras haber recopilado las imágenes capturadas por el dron, habrá que procesarlas mediante software especializado, para este caso se podría utilizar Quantum GIS, pero como no es un software específico para el procesamiento de imágenes capturadas por drones, se optará por la utilización de Pix4D, software líder en el procesamiento de imágenes aéreas y la generación de mapas 3D. Permite la creación de ortomosaicos, modelos digitales de elevación (DEM) y modelos 3D a partir de imágenes aéreas tomadas por drones. Este software también será capaz de detectar y resaltar objetos de interés, en este caso, puntos blancos que harán referencia a los nidos de la procesionaria del pino (Pix4D, 2023)
- **Generación de mapas y toma de decisiones:** Una vez procesada la información visual, se generarán mapas que facilitarán la toma de decisiones por parte de los responsables en la elección de los métodos adecuados para el manejo y control de la plaga de procesionaria en La Grajera
- **Seguimiento continuo:** Se realizará un seguimiento continuo, principalmente en el 3^{er} y 4^o estado larvario, que es donde se podrá apreciar la aparición de los nidos. Si los métodos que no supongan la utilización de métodos químico-biológicos como la reintroducción de aves mencionada en el siguiente punto, mantienen una presencia de la procesionaria del pino estable, no será necesario la utilización de otros métodos que incrementen aún más el gasto económico, por otro lado, no se pretende la eliminación total de la plaga, ya que las especies introducidas que aportarán una mejora en la biodiversidad basarán su alimentación en la procesionaria del pino.

3.10. Aplicación de técnicas ya conocidas que no se están utilizando en terreno local.

Para la realización de un control efectivo de la plaga *T.pityocampa* se van a aplicar diferentes medidas en la zona estudiada:

- Reintroducción de aves que se alimentan mayoritariamente de esta especie, de forma que no pongan en peligro el ecosistema ya formado en la zona de estudio, incentivando además que sean compatibles para el ecosistema.
- Utilización de elementos biológicos que sean sostenibles y efectivos, como puede ser la distribución de *Bacillus thuringiensis*.
- Aplicación de anillos mecánicos, colocación de más anillos en las zonas más críticas.

3.10.1. Reintroducción de aves

La primera y la más beneficiosa para el medio ambiente será la reintroducción de aves que ayudan al control de esta plaga en cierta medida. Es por ello, que para el estudio de las aves inventariadas en la zona de estudio se ha utilizado la herramienta Gbif.es para estudiar más detalladamente las aves ya presentes y su número.

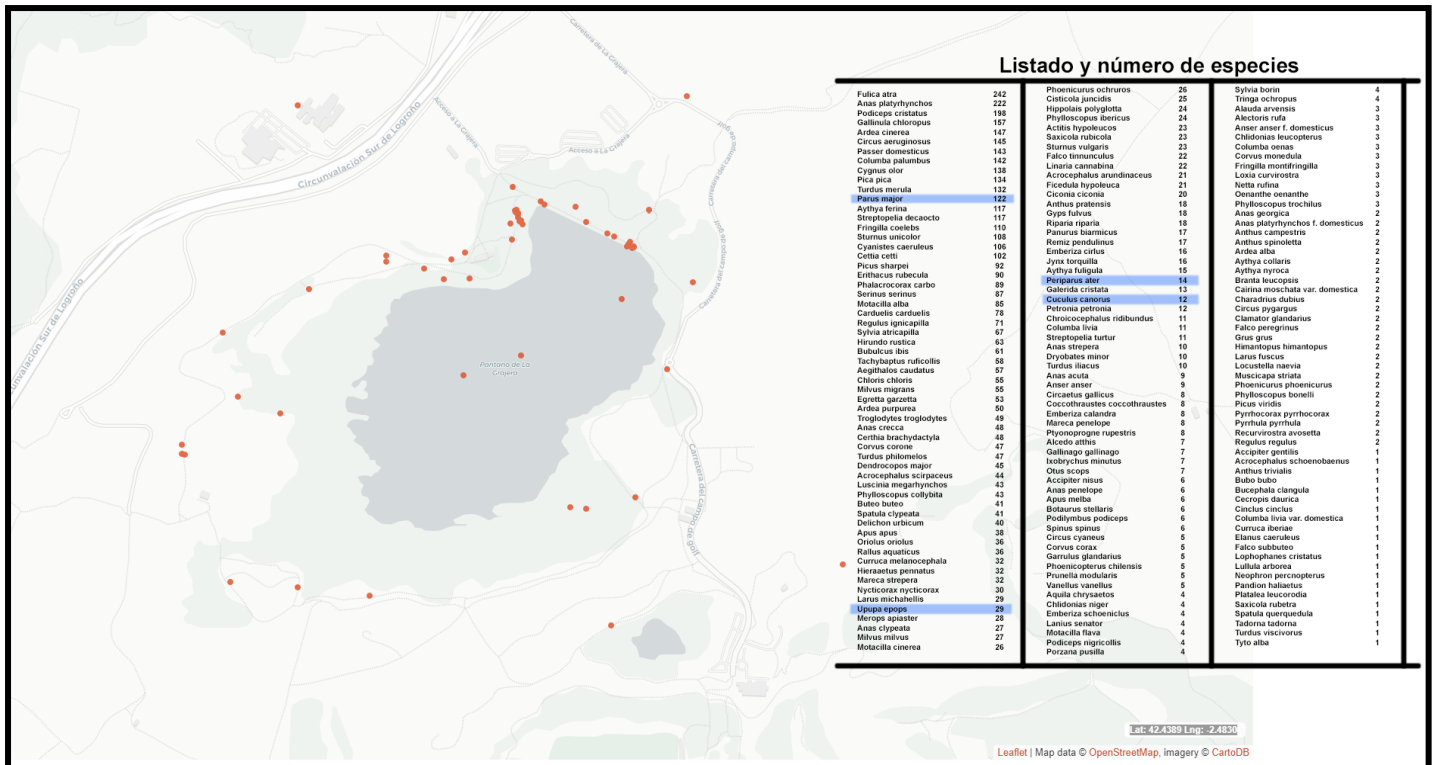


Figura 20. Aves presentes en la zona de estudio seleccionada. En la imagen utilizada se han resaltado las aves de la lista a reintroducir que ya se encuentran presentes en el área. (Gbif.es)

Se pretenderá introducir principalmente las especies que se alimenten de estados de la especie diferente para que no se produzca un conflicto evidente, de esta forma, pudiendo producir una disminución de la especie, siendo así un proyecto sin éxito para la zona estudiada.

Es por ello, que las especies que se van a introducir serán las siguientes:

Tabla 10. Especies óptimas para la depredación de *Thaumetopoea pityocampa*

Espece introducida	Fases de la procesionaria de la que se alimenta	% de alimentación
<i>Parus major</i>	Larvas, huevos e imagos en estado	60 - 90%

	larvario tardío	
<i>Clamator glandarius</i>	Larvas durante las procesiones	100%
<i>Cuculus canorus</i>	Larvas durante las procesiones	75%
<i>Lophophanes cristatus</i>	Huevos y larvas en estado temprano	60 - 90%
<i>Periparus ater</i>	Huevos y larvas en estado temprano	60%
<i>Upupa epops</i>	Pupas en primavera y principio de verano	70%
<i>Caprimulgus europaeus</i>	Polillas adultas en verano	80-90%

Tabla 11. Especies introducidas en La Grajera - La Rioja

Especie introducida	Número de avistamientos
<i>Parus major</i>	122
<i>Cuculus canorus</i>	12
<i>Periparus ater</i>	14
<i>Upupa epops</i>	29

Tal y como se puede observar en la **Tabla 11**, hay varias especies que se alimentan de diferentes estados de la especie, y pesar de que las especies ya presentes tienen un % de alimentación de procesionaria menor a la sugeridas (*Cuculus canorus* y *Periparus ater*), se ha llegado a la conclusión de que en vez de poner en riesgo el ecosistema añadiendo nuevas especies, tan solo se introducirá una especie que mayoritariamente se alimenta de polillas de la procesionaria, ayudando así al control de las diferentes etapas de la procesionaria.

Por lo que el resultado final en la reintroducción/introducción quedaría de la siguiente manera:

- ***Parus major***: Esta especie se mantendría por el elevado número de individuos
- ***Cuculus canorus***: Esta especie ya presente en el área de estudio se mantendrá a pesar de no presentar resultados tan efectivos como *Clamator glandarius*. La finalidad de estas medidas será simplemente facilitar el control de la procesionaria y no alterar el ecosistema añadiendo especies nuevas. Para mejorar el control de las plagas producidas por la especie estudiada se propone la reintroducción de más ejemplares y/o refuerzo de esta especie para incentivar la reproducción y mejorar la supervivencia de la especie entre otras cosas.
- ***Periparus ater***: Al igual que el caso anterior, esta especie se mantendrá en el área de estudio y se pondrán esfuerzos por introducir nuevos ejemplares que ayuden a que la especie se mantenga presente en el área y como consecuencia, prolifere en nuevas generaciones.
- ***Upupa epops***: Esta especie se mantendrá en el área de estudio.
- ***Caprimulgus europaeus***: Esta nueva especie será introducida en el ecosistema seleccionado y ayudará a disminuir la población de polillas de la procesionaria, disminuyendo así el número de huevos puestos. A pesar de las dificultades que supone la introducción de una nueva especie en el ecosistema, y el peligro que puede suponer para otra especie, es conveniente que exista una especie que se alimente de las polillas, evitando que las plagas sean más difícil de gestionar a posteriori. Además, tal y como se ha podido comprobar en la base de datos Gbif.es, esta especie es común en áreas circundantes a la Grajera.



Figura 21. *Caprimulgus europaeus* en áreas cercanas a la Grajera

3.10.2. Utilización de elementos biológicos

Una de las medidas complementarias para el control de esta especie en el parque de La Grajera va a ser la utilización del bioinsecticida *Bacillus thuringiensis* (BTK). Este es un método biológico que aprovecha las propiedades de una bacteria natural para combatir las larvas de la plaga que produce una toxina que ataca al tracto digestivo de las larvas de insectos, causando su muerte. Además, esta es inofensiva para los seres humanos y otros animales (mamíferos, aves y reptiles), ya que solo se activa en condiciones de pH alcalino, presente en el estómago de los insectos. Previamente se habló de dos formulaciones, pero tras observar diferentes estudios, se llegó a la conclusión que la formulación VBC 60074 tenía una dosis residual ligeramente más duradera que la preparación Foray 76B en las agujas de los pinos. Además son formulaciones consideradas respetuosas para el medio ambiente.

De esta manera, se podrá aplicar de forma complementaria a la reintroducción de aves, para mantener controlada la plaga de procesionaria manteniendo así un equilibrio en el ecosistema. La propuesta incluiría también la utilización de Drones que realizan la fumigación en los primeros estadios larvarios en la época de la oruga.

3.10.3. Utilización de anillos mecánicos

Por último esta medida será llevada a cabo en caso de que se necesite apoyo con las otras medidas, pero al ser necesaria tanta mano de obra y poner en riesgo la salud de los trabajadores debido al desprendimiento de los pelos urticantes de las orugas, no se recomienda seguir utilizando este sistema.



Figura 22. Utilización de anillo mecánico para el control de la procesionaria del pino (Killgerm)

3.11. Análisis DAFO

Aunque no se pueda llevar a cabo la propuesta en la práctica por el momento, el Análisis DAFO sigue siendo una herramienta valiosa. Esta brinda una comprensión profunda de la situación y permite tomar decisiones inteligentes incluso en un contexto teórico.

En este trabajo, se va a explorar cómo el Análisis DAFO puede ser útil en un enfoque puramente teórico. A pesar de no poder implementar de inmediato la propuesta, este análisis va a permitir identificar las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas. Estos conocimientos estratégicos van a servir para tomar decisiones más informadas y estar preparados para cuando se pueda llevar la propuesta al campo.

Así que, aunque por ahora no se pueda actuar, el Análisis DAFO nos va a brindar las herramientas para planificar y anticipar, lo que en última instancia nos ayudará a tener éxito en el futuro.

Tabla 10. Análisis DAFO

	Fortalezas	Debilidades
Análisis interno	<p>Drones</p> <ul style="list-style-type: none"> - Alta precisión y eficiencia, ya que la utilización de esta medida puede proporcionar una recopilación de datos precisa y eficiente. - Versatilidad - Reducción en la utilización de químicos <p>Bacillus thuringiensis</p> <ul style="list-style-type: none"> - Biológicamente seguro y no daña a otros organismos no objetivos. - No contamina el medio ambiente <p>Aves</p> <ul style="list-style-type: none"> - Control natural y sostenible del medio ambiente - Es respetuoso con el medio ambiente <p>Anillos mecánicos</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pueden evitar que las larvas se desplacen por los troncos - No utiliza productos químicos 	<p>Drones</p> <ul style="list-style-type: none"> - Costos iniciales elevados - Personal con habilidades para el manejo de drones y procesamiento de imágenes áreas - Limitaciones en la precisión. - Dependencia de condiciones climatológicas. <p>Bacillus thuringiensis</p> <ul style="list-style-type: none"> - Puede requerir aplicaciones periódicas para mantener su eficacia. - No es tan rápido como otros métodos para el control inmediato <p>Aves</p> <ul style="list-style-type: none"> - Depende de la presencia y comportamiento de las aves en la zona <p>Anillos mecánicos</p> <ul style="list-style-type: none"> - Requiere una instalación manual en cada árbol. - Puede ser laboriosa la instalación en cada árbol.
	Oportunidades	Amenazas
Análisis externo	<p>Drones</p> <ul style="list-style-type: none"> - Monitoreo continuo - Potencial en la replicación de datos. - Mejora en la investigación científica. - Posibilidad de exportación de la tecnología a otras áreas. <p>Bacillus thuringiensis</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mayor conciencia sobre la importancia de métodos biológicos y sostenibles en la agricultura y la silvicultura <p>Aves</p> <ul style="list-style-type: none"> - Posibilidad de promover la biodiversidad y el equilibrio ecológico en la zona <p>Anillos mecánicos</p> <ul style="list-style-type: none"> - Aceptación creciente de métodos físicos de control de plagas en la agricultura 	<p>Drones</p> <ul style="list-style-type: none"> - Posibilidad de fallos técnicos o accidentes que pueden interrumpir la recopilación de datos. - Interferencia de aves o depredadores - Robo de drones. <p>Bacillus thuringiensis</p> <ul style="list-style-type: none"> - Requiere una instalación manual en cada árbol. <p>Aves</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pérdida de hábitat y reducción de poblaciones de aves pueden limitar su eficacia <p>Anillos mecánicos</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pueden evitar que las larvas causen daños a los árboles durante la instalación. - Puede no ser efectivo en áreas con densidades muy altas de procesionaria

4. Discusión

Los resultados de esta investigación revelan una clara expansión de *Thaumetopoea pityocampa* a lo largo del tiempo en toda Europa. La evidencia geoespacial presentada en las figuras muestra un aumento en la distribución de esta especie desde 1994 hasta 2023. Esta expansión se atribuye en gran medida al aumento de las temperaturas invernales en el continente. A medida que las temperaturas mínimas en invierno han aumentado, *T. pityocampa* ha logrado adaptarse y colonizar áreas que previamente eran inhóspitas. Además, la presencia de especies adecuadas para su desarrollo, principalmente de la familia Pinaceae, ha facilitado su expansión hacia el norte de Europa.

Tal y como se ha podido comprobar en los estudios referentes a la fenología de la especie en La Sierra Calderona (López, 2014) y relacionando estos resultados con los datos previos obtenidos a la variación de temperatura en el tiempo, hemos observado cómo las larvas de *T. pityocampa* muestran una adaptación a los cambios climáticos. La estrategia "post-estival" adoptada por las larvas busca contrarrestar las altas temperaturas, lo que destaca la importancia de la temperatura en su ciclo de vida. Sin embargo, las fluctuaciones climáticas, como las lluvias intensas, también afectan la dinámica de población de la especie (López, 2014). La formación de nidos de invierno en estadios específicos de desarrollo refleja una adaptación gradual de las larvas al clima local, lo que demuestra la capacidad de esta especie para responder a las condiciones cambiantes.

Por otro lado, también se destaca la importancia de este parámetro en la alimentación de la especie, por lo que el análisis de las temperaturas invernales y su impacto en *T. pityocampa* demuestra la importancia de la "temperatura letal inferior". Las temperaturas más cálidas están influyendo en la distribución geográfica de la especie, y esta expansión puede tener implicaciones significativas en los ecosistemas locales. Con inviernos más cálidos, las larvas tienen más tiempo de alimentación, lo que reduce la probabilidad de temperaturas letales. Esto podría conducir a una expansión aún mayor de la especie en áreas previamente desfavorables.

Por tanto, *T. pityocampa* es un ejemplo destacado de cómo las especies pueden adaptarse al calentamiento global. Su capacidad para resistir temperaturas más cálidas en invierno ha permitido su expansión a áreas antes inaccesibles. Esta adaptación plantea desafíos para la gestión y conservación de la especie, ya que su presencia en nuevas regiones podría tener impactos ecológicos significativos (Battisti et al., 2005).

Es por eso, que todo este proceso de expansión y adaptación ha requerido de la ayuda del ser humano para poder controlar de forma efectiva la expansión inminente de esta plaga por toda Europa. Es por ello, que se han utilizado estrategias de control de plagas existentes que han evolucionado con el tiempo, pasando de enfoques más agresivos y no sostenibles a métodos más respetuosos con el medio ambiente. A pesar de los avances hacia enfoques sostenibles, como el uso de *Bacillus thuringiensis* (Huseyin et al., 2010) o la confusión de las polillas mediante la utilización de feromonas (Hiernaux y Hurtado, 2022), el control químico aún se emplea en casos extremos de infestación. De esta forma se necesita un esfuerzo continuo para promover prácticas de control de plagas totalmente sostenibles en la zona de estudio y en otros lugares.

En resumen, esta investigación destaca la importancia de comprender la relación entre las temperaturas y la expansión de *T. pityocampa*, así como la adaptación de la especie al cambio climático. También enfatiza la necesidad de implementar estrategias de control de plagas más sostenibles y efectivas para mitigar los impactos de esta especie en los ecosistemas locales. Los hallazgos de este estudio tienen implicaciones significativas para la gestión de plagas y la conservación de la biodiversidad en Europa.

5. Conclusión

En este estudio sobre la procesionaria del pino y su expansión en La Grajera, La Rioja, se ha demostrado de manera concluyente que las temperaturas juegan un papel crucial en la propagación de esta especie. Al analizar datos de bases de datos como GBIF, se ha establecido una relación directa entre el aumento de las temperaturas y la expansión de la procesionaria del pino en España y Europa. Además, se ha observado que las medidas de gestión implementadas en Europa actualmente son efectivas y sostenibles para controlar las plagas. Estas conclusiones subrayan la urgente necesidad de adoptar medidas más sólidas y sostenibles para el control de esta especie, ya que su rápida proliferación no solo amenaza la biodiversidad del ecosistema estudiado, sino que también representa un riesgo para la salud de los seres humanos y otros mamíferos, incluyendo animales de compañía. La utilización de tecnologías innovadoras, como el uso de drones para el mapeo y el seguimiento de nidos de procesionaria, demuestra un enfoque prometedor para el control de plagas y la preservación de la biodiversidad en la zona de estudio.

Además, es importante destacar que para complementar esta medida, se han considerado enfoques complementarios para abordar la propagación de la procesionaria del pino en La Grajera. Estos incluyen la introducción de aves depredadoras de la procesionaria, el uso de bioinsecticidas como el *Bacillus Thuringiensis* y la implementación de trampas con anillos mecánicos. Sin embargo, es crucial tener en cuenta que estas medidas complementarias, aunque desempeñan un papel importante en el control de la plaga, es improbable que la eliminen por completo. Se espera que trabajando en conjunto, estas estrategias contribuyan significativamente a mantener la población de procesionaria bajo control y preservar la salud de los bosques en La Grajera, al tiempo que se promueve una gestión sostenible y equilibrada del ecosistema.

6. Referencias bibliográficas

1. Almena, Procesionaria del pino, <http://www.j-alemany.com/es/plagas-y-enfermedades/procesionaria-del-pino-2/>.
Fecha de consulta : 14/08/2023
2. Agroquímicos Arca S.A de C.V, <https://www.facebook.com/1064814503718810/photos/a.1285340131666245/1567619270104995/?type=3>) Fecha de consulta : 21/08/2023
3. Arbolap, *Pinus halepensis*. <https://www.arbolapp.es/especies/ficha/pinus-halepensis/>.
Fecha de consulta : 08/08/2023
4. Battisti A, Stastny M, Netherer S, Robinet C, Schopf A, Roques A & Larsson S . (2005). Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures.. *Ecological Applications*, 15, 2084 - 2096.
5. Barbaro L & Battisti A. Birds as predators of the pine processionary moth (Lepidoptera: Notodontidae). *Biological Control*. 2010, 56, 107 - 114.
6. Cadullo et al.,(2010). *Pinus halepensis* and *Pinus brutia* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. (https://es.wikipedia.org/wiki/Pinus_halepensis#/media/Archivo:Pinus_halepensis_range.png).
7. Calleja, (2022). Aquí no hay playa... pero sí lago. (<https://www.eldiadelarioja.es/noticia/z89339fd9-e172-bf4a-62c25bd8f7270f87/202201/aqui-no-hay-playa-pero-si-lago>). Fecha de consulta : 07/08/2023
8. DJI. DJI Phantom 4 RTK. (<https://enterprise.dji.com>). Fecha de consulta: 20/08/2023
9. Gálvez, Los riesgos de la procesionaria del pino, (<https://www.cafmalaga.es/los-riesgos-de-la-procesionaria-del-pino/>). Fecha de consulta : 10/08/2023
10. García. Asesor en Gestión Integrada de la Sanidad Vegetal: La procesionaria del pino (*Thaumetopoea pityocampa*). (<https://heliconia.es/asesor-en-gestion-integrada-de-la-sanidad-vegetal-la-procesionaria-del-pino-thaumetopoea-pityocampa/>). Fecha de consulta : 07/08/2023
11. Hiernaux L & Hurtado A. (2022) Ensayo de tratamiento con confusión sexual para el control de la procesionaria del pino *Thaumetopoea pityocampa* en parques forestales de Madrid. *Sociedad Española de Ciencias Forestales*.
12. Huseyin H, Tamer R, Acer S. (2010) Control of pine processionary moth, *Thaumetopoea pityocampa* with *Bacillus thuringiensis* in Antalya, Turkey. *Journal of Environmental Biology*. 31, 257 - 361.

13. J. A. Pascual, Biología de la Procesionaria del roble (*Thaumetopoea processionea* L.)(Lep. Thaumetopoeidae) en el centro-oeste de la Península Ibérica. 1988. Bol. San. Veg. Plagas, 14, 383-404.
14. Junta de Extremadura Consellería de Industria, Energía y medio ambiente, La procesionaria del pino (*Thaumetopoea pityocampa* Den. y Schiff.). Manual para la evaluación de los niveles de infestación en rodales de seguimiento. Fecha de consulta: 12/08/2023.
15. Lepispteron, (2016), Procesionaria del pino, <http://lepispteron.blogspot.com/2016/03/hilera-de-procesionarias-hembra-adulta.html>. Fecha de consulta : 12/08/2023
16. López, E., (2014). Estudio de la dinámica poblacional del lepidóptero *Thaumetopoea pityocampa* (Denis y Schiffermüller, 1775) (Notodontidae) en la provincia de Valencia (España). Universidad de Valencia.
17. Molina. Procesionaria del pino, <https://krispyyamaguchy.blogspot.com/2010/01/procesionaria-del-pino.html>. Fecha de consulta : 16/08/2023
18. Pix4D. Pix4D Software. <https://www.pix4d.com/>. Fecha de consulta: 20/08/2023
19. Ruiz. (2018) Ruiz Tutor considera controlada la plaga de procesionarias en Logroño. Diario de La Rioja. <https://www.larioja.com/logrono/ruiz-tutor-considera-20180313003823-ntvo.html>
20. Smith, J. (2021). Uso de cámaras RGB de alta resolución para la detección de objetos en drones. Revista de Tecnología y Ciencia Aplicada, 15(3), 45-56.
21. Ventusky. <https://www.ventusky.com/>. Fecha de consulta: 19/08/2023