



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍA EN ALIMENTOS Y
BIOTECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA BIOQUÍMICA



Caracterización nanoscópica superficial de la estructura de las alas del insecto andino
Platycoelia (catzo ecuatoriano) a través de microscopia de fuerza atómica.

Trabajo de titulación, en la modalidad de proyecto de investigación, previo a la obtención de título de Ingeniero Bioquímico, otorgado por la Universidad Técnica de Ambato, a través de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología.

Autor: Jonathan Eduardo Chauca Luna

Tutor: PhD. Santiago Casado Rojo

Ambato-Ecuador

Marzo - 2022

APROBACIÓN DEL TUTOR

PhD. Santiago Casado Rojo

CERTIFICA:

Que el presenta trabajo de titulación ha sido prolijamente revisado. Por lo tanto, autorizo la presentación de este Trabajo de Titulación bajo la Modalidad Proyecto de Investigación, el mismo que responde las normas establecidas en el reglamento de Títulos y Grados de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología

Ambato, 06 de enero de 2022

PhD. Santiago Casado Rojo

C.I. 1759126954

TUTOR

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD.

Yo, Chauca Luna Jonathan Eduardo, manifiesto que los resultados obtenidos en el presente trabajo de titulación, modalidad Proyecto de Investigación, previo a la obtención del título de Ingeniero Bioquímico, son absolutamente originales, auténticos y personales; a excepción de las citas bibliográficas.

.....

Chauca Luna Jonathan Eduardo

C.I. 1805200811

AUTOR

APROBACIÓN DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los suscritos Profesores Calificadores, aprueban el presente Trabajo de Titulación, modalidad Proyecto de Investigación, el mismo que ha sido elaborado de conformidad con las disposiciones emitidas por la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato.

Para constancia firman:

Presidente de Tribunal

Lic. M Sc. Danae Fernández Rivero

C.I. 1757181209

PhD. Mirari Yosune Arancibia Soria

C.I. 1802142461

Ambato, 21 de febrero de 2022

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Trabajo de Titulación o parte de él, como documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución. Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi Trabajo de Titulación, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

.....

Chauca Luna Jonathan Eduardo

C.I. 1805200811

AUTOR

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo de titulación a mi familia, especialmente a mis padres Eduardo y Jeny por todo el esfuerzo que han tenido que realizar a lo largo de su vida para que no me falte nada en mi vida ni en mi carrera estudiantil, a mi hermana Jenevith la cual ha sido mi compañía y soporte a lo largo de los años brindándome motivación y cariño. A mi abuelita Pastoriza la cual fue un pilar fundamental en mi crianza y desde el cielo ha sido mi inspiración para conseguir todos mis objetivos. A mi novia Alison con la cual siempre he contado con su apoyo y amor incondicional, así como a mi amigo Erick que desde el colegio me ha brindado su amistad, consejos y palabras de aliento.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios el cual que me ha brindado la fuerza y voluntad para poder superar cada obstáculo presentado en el camino y lograr completar ésta importante etapa en mi vida. A mi familia la cual ha sido un apoyo imprescindible a lo largo de mi carrera estudiante y mi vida, a mis amigos los cuales han sido un soporte importante para abordar cualquier dificultad de la mejor manera. A mi tutor de tesis PhD. Santiago Casado Rojo, que me ha guiado a lo largo de mi carrera compartiendo sus conocimientos conmigo lo que me ha permitido desarrollar este proyecto de titulación de la mejor manera, por haber confiado en mí y haberme brindado la oportunidad de haber trabajado con él.

ÍNDICE GENERAL

APROBACIÓN DEL TUTOR.....	ii
DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD.....	iii
APROBACIÓN DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL DE GRADO.....	iv
DERECHOS DE AUTOR.....	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT	xii
CAPITULO I.....	1
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1 Antecedentes de la investigación	1
1.1.1 Platycoelia (Catzo Ecuatoriano)	1
1.1.2 Microscopio de Fuerza Atómica.....	2
1.1.3 Modo de operación Contacto del Microscopio de Fuerza Atómica.	2
1.1.4 Importancia del Catzo andino y estructura de sus alas.	3
1.1.5 Nano y microestructuras de las alas de insectos mediante AFM.....	4
1.1.6 ¿Qué es la Biomimética?	5
1.1.7 Efecto Stick-slip.	6
1.2 Objetivos.....	7
1.2.1 Objetivo General.....	7
1.2.2 Objetivos Específicos	7
CAPITULO II	8
2. MATERIALES Y MÉTODOS	8
2.1 Materiales.....	8
2.1.1 Material de Laboratorio	8
2.1.2 Reactivos	8
2.1.3 Equipos	8
2.2 Métodos.....	8

2.2.1 Recolección de la muestra	8
2.2.2 Esterilización y preparación de la muestra	9
2.2.3 Identificación de la estructura Superficial del catzo mediante Microscopia Óptica.....	9
2.2.4 Identificación de la nanoestructura del catzo mediante el AFM.	10
2.2.5 Procesamiento de las imágenes mediante Microscopia óptica.	10
2.2.6 Procesamiento de las imágenes obtenidas mediante Microscopia de Fuerza Atómica.....	11
2.2.7 Identificación de posibles estructuras periódicas mediante Transformada Rápida Bidimensional de Fourier.....	11
CAPITULO III.....	13
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	13
3.1 Caracterización de las alas del catzo “ <i>Platycoelia</i> ” mediante la aplicación de un microscopio óptico.....	13
3.2 Estructura periódica macroscópica identificada en el ala del Catzo <i>Platycoelia</i>	15
3.3 Caracterización nanoscópica del borde de las alas del catzo andino “ <i>Platycoelia</i> ” Mediante AFM.....	18
3.4 Caracterización nanoscópica de la membrana de las alas del catzo andino “ <i>Platycoelia</i> ” Mediante AFM.....	21
CAPITULO IV.....	24
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	24
4.1 Conclusiones	24
4.2 Recomendaciones.....	25
BIBLIOGRAFÍA.....	26

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Imagen de la superficie presente en el borde del ala del insecto "Platycoelia" mediante microscopía óptica (Lente 4x).....	13
Figura 2. A) Macroestructura en forma de lima presente en el borde del ala del insecto "Platycoelia" obtenida por microscopía óptica (Lente 4X) B) Macroestructura Simétrica presente en el borde del ala del insecto Ataenius erratus obtenida por Microscopía de Barrido en la literatura.....	14
Figura 3. Caracterización macroscópica de la membrana del ala del Catzo Andino.	15
Figura 4. A) Imagen procesada digitalmente del borde del Ala mediante el programa Gwyddion B) Perfil estructural macroscópico de las alas del catzo andino.	16
Figura 5. Transformada Rápida Bidimensional de Fourier del borde del ala del Catzo.	17
Figura 6. Secciones analizadas mediante microscopia óptica y de Fuerza Atómica	18
Figura 7. A) Caracterización topografía del borde del Ala de Platycoelia Mediante AFM. B) Perfil estructural nanoscópica. C) Transformada Rápida Bidimensional de Fourier.....	19
Figura 8. A) Caracterización topografía del borde del Ala de Platycoelia Mediante AFM. B) Perfil estructural nanoscópica. C) Transformada Rápida Bidimensional de Fourier.....	20
Figura 9. Caracterización Topográfica de la membrana superficial del ala del insecto "Platycoelia".....	21
Figura 10. A) Perfil estructural nanoscópica de la membrana superficial de las alas de Platycoelia. B) "Power Spectrum" de la muestra del ala.	22
Figura 11. Transformada Rápida Bidimensional de Fourier de la membrana del ala del catzo "Platycoelia"	23

RESUMEN

La biomimética es la ciencia que estudia de manera biológica a los diferentes organismos vivos y la manera en que estos han sido capaces de resolver problemas complejos para los que la humanidad aún no ha podido encontrar una solución óptima. La aplicación de la microscopía de fuerza atómica permite ampliar el conocimiento nanoscópico e identificar nanoestructuras que pueden ayudar a la creación de nuevos materiales biomiméticos.

La presente tesis se ha enfocado en el estudio estructural del catzo andino *Platycoelia* que a pesar de ser una especie que se ha reducido a medida que la población urbana ha aumentado, posee ciertas características de interés en sus alas los cuales a lo largo de los siglos ha sufrido diversas alteraciones evolutivas proporcionándoles ciertas propiedades de interés para la investigación de la Biomimética. Se extrajeron las alas del cuerpo del insecto y se analizaron mediante microscopía óptica y de fuerza atómica. Se logró detectar mediante la transformada Rápida Bidimensional de Fourier (FFT) la existencia de cierta estructura periódica responsable de las vibraciones y la producción de su sonido característico durante el vuelo.

Además, mediante AFM se realizó un estudio topográfico sobre la membrana del ala la cual mediante la interpretación del Power Spectrum se identificó que existe cierto grado de periodicidad y, posteriormente, mediante la aplicación de la FFT, se determinó que existe un cierto grado de periodicidad.

Palabras clave: Biomimética, Insectos Andinos, Nanoestructura de insectos, *Platycoelia*, Catzo Andino.

ABSTRACT

Biomimetics is the science that explores, from a biological description, different living organisms and how they have been able to solve complex problems still unsolved by the mankind. The application of atomic force microscopy allows us to extend nanoscopic knowledge and identify nanostructures that can help in the creation of new biomimetic materials.

The present document is focused on the structural study of the Andean catzo *Platycoelia*. Despite being a species that has been reduced due to the urban population rise, the insect presents certain characteristics of interest in its wings that over the centuries have undergone several evolutionary alterations, providing them with certain properties of interest for the research of Biomimetics. The wings were extracted from the insect's body and analyzed by optical and atomic force microscopy. The existence of a certain periodic structure responsible for the vibrations and the production of its characteristic sound during flight was detected by two-dimensional Fast Fourier Transform (FFT).

In addition, by means of AFM, a topographic study of the wing membrane was carried out and, through the interpretation of the Power Spectrum and the FFT, it was identified that there is a certain degree of periodicity.

Keywords: Biomimetics, Andean insects, Nanostructure of insects, *Platycoelia*, Andean Catzo.

CAPITULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes de la investigación

1.1.1 *Platycoelia (Catzo Ecuatoriano)*

Dentro de Ecuador existe un gran número de insectos con altos potenciales de interés para la investigación del país como el catzo andino perteneciente al género *Platycoelia* el cual es una especie de escarabajo estercolero que se lo puede encontrar en las tierras altas (1800-4000 msnm) de Ecuador que incluso se los destaca dentro del catálogo como un insecto de valor forense, este a su vez se puede diferenciar de los demás escarabajos andinos debido a su gran tamaño el cual comúnmente alcanza los dos centímetros y un color característico crema o café [1].

Sin embargo, esta especie es efímera, lo que indica que este emerge una sola vez en su edad adulta y luego los machos mueren rápidamente, por lo que muchas veces pasa desapercibida su presencia en las comunidades, eso posiblemente se deba al incremento de la población urbana dentro del hábitat de ésta especie, ya en la década de los 2000 se podían encontrar cientos de ejemplares fácilmente entre las hierbas de la zona rural, y actualmente debido al aumento de la población y la destrucción progresiva de los pastizales y prados ha desencadenado que el número de escarabajos se reduzca de manera drástica [2].

En cuanto al ciclo de vida del Catzo Andino (*Platycoelia*) consiste en que el macho posterior a fecundar los huevos almacenados en el abdomen de la hembra, estos son depositados bajo tierra donde las larvas permanecen durante un tiempo aproximado de 10 meses en donde las larvas mudan de piel hasta 3 veces debido a su crecimiento, hasta que estos que pasan por su ultimo estado larval, también conocido como “pupa”, el cual consiste en una capsula en la cual se reabsorben los órganos juveniles para adquirir una estructura totalmente diferente, y finalmente emergen a la superficie como escarabajos o catzos adultos con la finalidad de reproducirse dando como resultado que el ciclo se repita nuevamente, los machos, tras la cópula, mueren o son consumidos por aves o lagartijas [3].

1.1.2 Microscopio de Fuerza Atómica

La microscopia de fuerza atómica desde su creación en la década de los 80's es considerada actualmente como un gran pilar de la nanociencia, ya que se pueden obtener imágenes tridimensionales de alta resolución de la superficie de distintos materiales, la cual, además nos permite estudiar las diferentes propiedades mecánicas y eléctricas como la adhesión y rigidez con una resolución atómica debido a su funcionamiento [4].

El microscopio de fuerza atómica nos ayuda a obtener imágenes de alta resolución mediante las fuerzas de interacción que se generan entre la superficie del material estudiado y el extremo de una punta que se encuentra al final de un fleje (cantiléver), el cual se flexiona dependiendo de las fuerzas mencionadas. La determinación de la estructura nanoscópica se realiza por la variación del movimiento vertical piezoeléctrico generado al mantener la misma posición de un haz de un láser que incide en un fotodiodo tras reflejarse en el cantiléver. En el caso de que se aumente la deflexión del cantiléver por haber encontrado una cierta altura el material piezoeléctrico deberá levantar el cantiléver para recuperar la deflexión inicial y en caso de que encuentre un valor inferior de la superficie el material piezoeléctrico deberá descender para de igual manera recuperar la deflexión inicial, la diferencia de altura que detecta el material piezoeléctrico es lo que se interpreta como la altura de la superficie del material a estudiar. Este equipo permite la utilización de varios modos de operación entre los que se encuentran: contacto, no contacto y "tapping" o semi-contacto [5].

1.1.3 Modo de operación Contacto del Microscopio de Fuerza Atómica.

El modo de contacto o también conocido por sus siglas en inglés Cm (Contact Mode), éste posee un funcionamiento el cual se basa principalmente en la posición donde

incide el haz de luz láser en un fotodiodo, en donde si esta posición implica una flexión del cantiléver la función del escaneo se mantiene durante todo el análisis y escaneo de la muestra, en la cual si se encuentra una superficie a una altura determinada esta flexión se incrementaría produciendo que el material piezoeléctrico del AFM a levantar el cantiléver para recuperar la flexión inicial. Este movimiento vertical se lo conoce como altura. Si la flexión del cantiléver disminuye, el sistema bajaría el cantiléver para recuperar la flexión inicial. Esta disminución se interpreta como altura [5] [6].

1.1.4 Importancia del Catzo andino y estructura de sus alas.

Los catzos han sufrido diversas alteraciones evolutivas a lo largo de los siglos, entre las que se encuentra la capacidad de volar; no obstante, estos escarabajos, a diferencia de las aves, poseen una gran agilidad durante el vuelo gracias a sus alas y a la cinemática que éstas adquieren en cada aleteo; ya que la estructura de las alas permite que el insecto realice maniobras extremadamente complicadas, generando diferentes mecanismos aerodinámicos [7]. Estas características del vuelo de los insectos se deben en gran medida a la estructura de las alas, ya que éstas están conformadas por la unión de un par de láminas membranosas, las cuales en su interior se encuentran reforzadas por una gran cantidad de fibras huecas y esclerosadas, conocidas comúnmente como venas o nervaduras que son las que le otorgan una dureza que impide que éstas se rompan durante el vuelo [8].

La estructura de las alas de un insecto está conformada de diferentes componentes como es la axila, que es el mecanismo que mantiene unidas a las alas con el cuerpo del insecto. La rigidez característica de las alas del catzo es causada por la presencia de las venas, ya que éstas constan de tubos cuticulares que normalmente poseen hemolinfa que se refiere al líquido circulatorio que poseen los animales invertebrados como los insectos que es equivalente a la sangre y linfa en las especies vertebradas, así también como nervios, además de que éstas transmiten cargas experimentadas durante el vuelo hacia todo el cuerpo del insecto y éstas, al estar conectadas directamente con la membrana, actúan como una barrera para el paso del aire. La membrana tiene como

función principal el acelerar el aire en dirección al suelo con la finalidad de mantener la elevación durante el vuelo. El ala posee un grosor aproximado de 1mm [9].

En algunos de los estudios realizados se identifican diferentes estructuras irregulares en la parte delantera del ala del insecto en Lalybir Beetle "*Coccinella septempunctata*" [10], así también como una superficie rugosa y dentada que se proyecta verticalmente desde la superficie a la membrana, demostrando el potencial de estas estructuras para mejorar las tecnologías enfocadas al desarrollo de la biomimesis, ciencia que trata de establecer posibles soluciones a problemas humanos imitando procesos naturales a través de sistemas mecánicos o procesos químicos [11].

1.1.5 Nano y microestructuras de las alas de insectos mediante AFM.

Las alas de los insectos están compuestas diferentes microestructuras y nanoestructuras de una manera jerárquica, compleja, funcional y natural la cual con el paso de los años han llegado a cumplir con diferentes especificaciones impuestas por la selección natural con un alto potencial para la inspiración de la ingeniería en cuanto a la construcción de nuevos materiales biomiméticos con propiedades específicas como es la de resistencia al agua [12].

En los resultados documentados por Watson, Myhra y Cribb, se han identificado ciertas nanoestructuras periódicas presentes en las alas de las cigarras mediante la implementación de microscopia de fuerza atómica, la cual consta de ciertas protuberancias hexagonales con un tamaño aproximado de 200 nm, las cuales no cumplen la función únicamente de camuflaje ante sus depredadores, además de que son resistentes a la contaminación ambiental, debido a que cuentan con una superficie anti humectante y autolimpiable, las cuales han sido demostradas mediante la exposición de diferentes componentes como luz blanca y líquidos expuestos a diferentes mediciones por AFM, en donde se concluye que las alas de las cigarras cuentan con una membrana que posee una baja energía superficial, lo que conlleva que gracias a su nanoestructura en combinación con una composición química la convierten en una tecnología natural, la cual le confiere una resistencia ante la contaminación[13].

Esto es posible explicar mediante la teoría de Wenzel la cual infiere que cuando se coloca una gota de líquido sobre el ala de la cigarra que está compuesta por protuberancias y una periodicidad, en la cual el líquido únicamente llenara los espacios vacíos del ala lo cual refuerza sus propiedades hidrófobas [14].

En contraste, en un estudio realizado por Wagner, Pittendrigh y Raman, en el cual se analizaron las nanoestructuras presentes en las alas de la cepa *Drosophila melanogaster* o también conocida como mosca de Vinagre, en las cuales se identificó que éstas poseen una estructura jerárquica con ciertas vellosidades con un tamaño aproximado de 10 a 20 μm de largo y 0,5 a 1 μm de diámetro [15].

En ésta muestra, mediante la implementación de microscopía de fuerza atómica, se estudiaron los sistemas mecánicos de las protuberancias, así como los módulos de elasticidad local y de adhesión de la mosca de vinagre en dos diferentes niveles de humedad, en la cual se identificó que no existe una diferencia significativa de adhesión entre la nanoestructura en forma de loto con la membrana del insecto, por lo que se infiere que ésta únicamente ayuda a que aumente considerablemente la hidrofobicidad [15].

1.1.6 ¿Qué es la Biomimética?

Actualmente se considera a la Biomimética como una rama de la ciencia la cual se encarga de estudiar de manera biológica a los organismos vivos y la manera en lo que estos resuelven problemas complejos que la humanidad no ha podido encontrar una solución, con la finalidad de utilizar la información de desarrollo evolutivo de las especies que se ha sido perfeccionado a lo largo de millones de años y obtener diferentes diseños que puedan beneficiar la sociedad actual. Gracias a esto en los últimos años se han desarrollado nuevos productos como es la de pegamentos no tóxicos, dentro de la arquitectura ha ayudado a diseñar nuevas estructuras más resistentes y ligeras, sensores, redes neuronales y especialmente medios de transporte empleando el conocimiento adquirido gracias a las estructuras aerodinámicas de las alas de los insectos [16].

Para que la biomimética pueda ser implementada como una herramienta de diseño, se debe realizar un proceso el cual conlleva a una espiral de diseño que consta de 6 conceptos diferentes los cuales son: Identificar, Interpretar, Descubrir, Resumir, Emular y Evaluar [17]

1.1.7 Efecto Stick-slip.

Hoy en día a la fricción se la conoce como la resistencia al movimiento de deslizamiento de diferentes objetos, lo cual es un fenómeno muy común dentro de la vida cotidiana de la sociedad actual que comúnmente se generan en las asperezas a diversas escalas. Sin embargo, la fricción que se genera a nanoescala ha sido escasamente estudiada a lo largo de los años. Un fenómeno de fricción común es el denominado Stick-slip, el cual se produce por la ruptura del equilibrio que ocurre cuando dos materiales se frotan de una manera periódica entre sí, los cuales llegan a generar un fluctuación continua y periódica entre los regímenes estáticos y dinámicos, a este fenómeno se lo puede encontrar en diferentes sistemas de rodamientos, así como de frenado, entre otros fenómenos [18].

Sin embargo, la gran problemática se encuentra en que al existir una fricción constante se generan el desgaste de las estructuras que son sometidas entre sí, como por ejemplo se puede producir estrías, fracturas y rupturas de los distintos materiales. Por lo que actualmente la tecnología de rodamientos se ha enfocado en identificar estructuras que reduzcan la resistencia a la fricción, sin alterar la funcionalidad de dichos componentes, siendo una alternativa la nanoestructura de los insectos ya que estos al estar friccionando de manera constante el ala con el abdomen para producir las vibraciones y el sonido característico de apareamiento, sin embargo, estas estructuras no presentan desgastes en las secciones en las cuales se genera el efecto Stick-slip [19].

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Determinar la estructura superficial de las alas del Catzo “*Platycoelia*” a través del microscopio óptico y la estructura nanoscópica mediante el uso del microscopio de fuerza atómica.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Extraer las alas presentes en una muestra de catzo perteneciente a la especie “*Platycoelia*”.
2. Establecer con el microscopio de fuerza atómica la topografía tridimensional presente en las alas del catzo andino de la especie “*Platycoelia*”, mediante del modo contacto.
3. Identificar la periodicidad espacial de posibles nanoestructuras presentes en las alas del Catzo ecuatoriano.

CAPITULO II

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

2.1.1 Material de Laboratorio

- Cubreobjetos
- Frascos de Vidrio
- Pinza Metálica
- Guantes estériles
- Portaobjetos metálicos de AFM
- Puntas de AFM modo contacto

2.1.2 Reactivos

- Etanol y Metanol al 96%

2.1.3 Equipos

- Microscopio de Fuerza Atómica
- Microscopio óptico

2.2 Métodos

2.2.1 Recolección de la muestra

La Recolección de la muestra se realizó en el cantón Ambato perteneciente a la provincia de Tungurahua con una altura de 2600 msnm, mediante el uso de una red manual siguiendo el protocolo establecido por Arnaldos, Romera, García y Luna [20], que se detalla a continuación:

- Se registraron los datos ambientales del escenario al tomar al insecto, teniendo en cuenta la temperatura y la humedad.

- Se recolectó al insecto mediante el uso de una red manual, manejando cuidadosamente al insecto.
- Se colocó al insecto en un frasco de vidrio estéril para evitar contaminaciones dentro del área de interés.
- Se etiquetó el frasco correctamente siguiendo el siguiente lineamiento: Localidad; Lugar de recolección; Fecha de recolección, N° de Muestra y Recolector.

2.2.2 Esterilización y preparación de la muestra

El insecto se sometió a un proceso de esterilización para eliminar la mayor cantidad de contaminantes externos por lo cual se debe seguir el siguiente procedimiento:

- Se fijó en alcohol la muestra durante 24 horas, mientras que a otra muestra del insecto no se sometió a ningún procedimiento de desinfección para realizar mediciones sin que se vea alterada la estructura del ala.
- Se removió del cuerpo del escarabajo las alas del lado izquierdo y derecho.
- Se identificó la sección a analizar mediante el uso de un microscopio óptico.
- Adicional se realizó cortes superficiales en la estructura del ala para su posterior análisis [21].

2.2.3 Identificación de la estructura Superficial del catzo mediante Microscopia Óptica.

Para la identificación de las estructuras de las alas del insecto a macroescala fue necesario la implementación del siguiente proceso.

- Se colocó la muestra sobre un portaobjeto, asegurándola con cinta adhesiva en sus extremos.
- Se procedió a colocar la muestra sobre el microscopio óptico, previamente encendido y configurado.
- Se enfocó la muestra con el objetivo de microscopio de 4x.

2.2.4 Identificación de la nanoestructura del catzo mediante el AFM.

Para la identificación de la nanoestructura del insecto fue necesario realizar la siguiente metodología:

- Se seleccionó el ala posterior a su extracción del Catzo andino y la punta necesaria para utilizar el equipo en modo contacto [22].
- Mediante el uso de un adhesivo se fijó la muestra a la placa para su posterior análisis.
- Se insertó la muestra en el dispositivo, previamente ubicado correctamente la punta en la plataforma.
- Se descendió todo el objetivo óptico para identificar la sección de la muestra a analizar.
- Se cerró el sistema de aislamiento de vibraciones para evitar errores durante el muestreo y análisis por parte del escáner.
- Se calibraron los parámetros necesarios para el análisis de las propiedades físicas de la muestra:
 - El rango de análisis de la muestra fijada la cual realizó mediciones en los siguientes rangos: 50 y 30 μm .
 - La resolución de la imagen se fijó en 512*512 píxeles.
 - Se ajustó la velocidad de escaneo durante la medición entre 0,5 y 1 Hz dependiendo de la topografía de la muestra, ya que este parámetro ajusta la frecuencia a la cual el escáner se mueve sobre la superficie.
 - Finalmente se seleccionó el método de operación de contacto [23].

2.2.5 Procesamiento de las imágenes mediante Microscopia óptica.

Para el procesamiento de las imágenes obtenidas mediante microscopia óptica, fue necesaria la implementación del programa informático Gwyddion el cual mediante la aplicación del modo de ilustración de píxeles que consiste en la detección de los píxeles proporcionando colores blancos a las orillas o protuberancias con una altura determinada, así como de píxeles negros a ciertas superficies que presentan una profundidad determinada, con la finalidad de obtener el perfil de las imágenes

procesadas e identificar la altura de las diferentes macroestructuras del ala del insecto[24].

2.2.6 Procesamiento de las imágenes obtenidas mediante Microscopia de Fuerza Atómica

A través del programa XEI, se procesaron las imágenes obtenidas mediante la aplicación de la microscopía de fuerza atómica, en donde se obtuvo el perfil de altura correspondiente a la topografía de las alas del insecto, así como los diferentes valores estadísticos como las alturas máximas y mínimas de los picos presentes en la superficie de la muestra, además del espectro de poder o “Power Spectrum” que ayuda a identificar la presencia de estructuras periódicas, mediante la formación de ondas de acuerdo a las intensidades de los componentes de la frecuencia existente sobre una línea seleccionada[25].

2.2.7 Identificación de posibles estructuras periódicas mediante Transformada Rápida Bidimensional de Fourier.

Actualmente la transformada de Fourier es una importante herramienta para el procesamiento de imágenes digitalizadas, en donde se descompone dicha figura en seno y coseno, en este caso donde la Transformada Rápida Bidimensional de Fourier la cual es utilizada en caso de que las imágenes sean bidimensionales resultando en la función $f(x, y)$, siendo la expresión matemática la siguiente:

$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-i2\pi(ux+vy)} dx dy$$

$$f(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(u, v) e^{i2\pi(ux+vy)} du dv$$

Donde u y v son variables de frecuencia, sin embargo, este procesamiento matemático lo realiza los diferentes programas informáticos utilizados para el procesamiento de

las imágenes, en donde los datos de la altura espacial se convierten en dominio de frecuencia después de la transformada de Fourier, dando como resultado que los picos del espectro de potencia aparecen brillantes sobre un fondo oscuro, además de colores de diferentes intensidades, en donde las unidades X y Y en el espectro de potencia son $1/\mu\text{m}$. Cada frecuencia espacial dentro de la imagen real está representada mediante un pico en la figura de espectro de potencia, los cuales representan periodicidades reales de la superficie [26].

CAPITULO III

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización de las alas del catzo "*Platycoelia*" mediante la aplicación de un microscopio óptico.

Mediante la implementación del microscopio óptico se pueden identificar varias características de interés a diferentes escalas, como es la presencia del principal elemento estructural de las alas del insecto en donde se aprecia las venas tal y como se puede identificar en la *figura 1* las cuales recorren gran parte de la membrana del ala, y según lo establecido por Wagner, Pittendrigh y Raman [9] éstas, al estar cubiertas directamente con la membrana, sirven como barrera para el paso del aire proporcionando una elevación estable al insecto durante el vuelo.

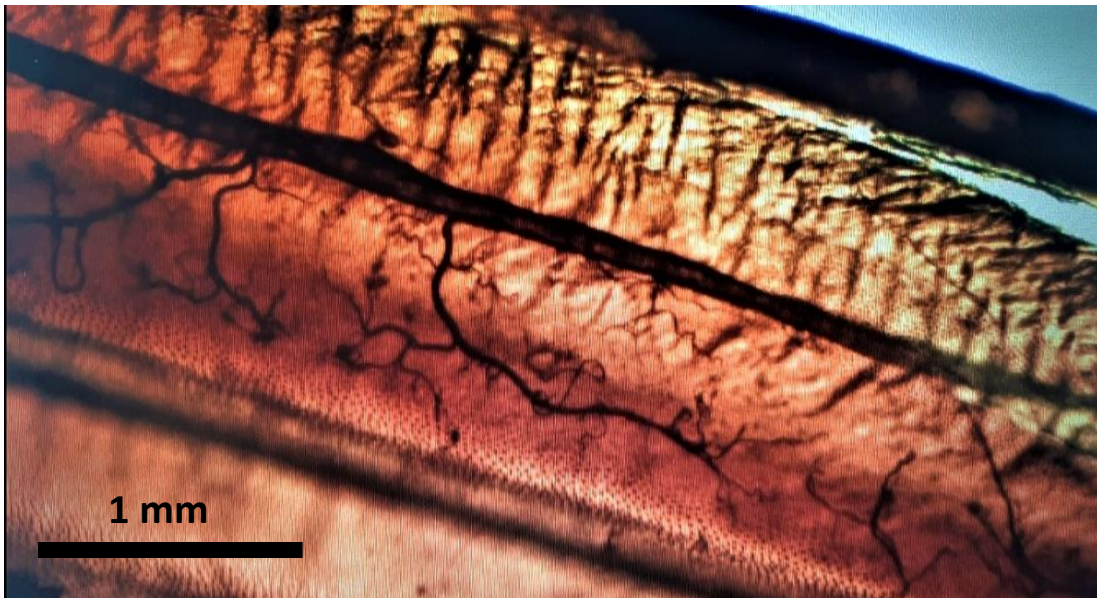


Figura 1. Imagen de la superficie presente en el borde del ala del insecto "*Platycoelia*" mediante microscopía óptica (Lente 4x).

Las venas que se puede observar en la figura 1, se extienden por todo el largo del ala en forma de cuerda desde la axila de ésta, proporcionando rigidez en la flexión general y local, así como las deformaciones elásticas durante el vuelo. Además, se pueden identificar protuberancias en el extremo superior del ala lo que sugiere que existe

periodicidad en la estructura de ésta, por lo cual se infiere que es la responsable de brindar el sonido característico de este insecto durante el vuelo [27].

Según Kasper & Hirschberger, los cuales establecen que la mayoría de los escarabajos cuentan con un aparato estridulador responsable de producir vibraciones lo que permite la comunicación entre ellos, esta actividad acústica de los escarabajos es producida mayormente durante el cortejo y apareamiento de los mismos. Sin embargo, los Catzos machos producen un canto complejo el cual cuenta con diferentes patrones temporales para atraer la atención de la hembra con la finalidad de aparearse, mientras que la hembra, a pesar de contar con la misma morfología del macho, únicamente puede producir sonidos aleatorios [27].

Para que las vibraciones lleguen a producirse es necesaria la fricción entre el abdomen del catzo y el ala, ya que el abdomen al extenderse y contraerse, el raspador presente en el mismo se mueve a través de las protuberancias que se encuentran la parte superior del ala. En el caso del insecto *Platycoelia* se puede identificar en la figura 2A que en la parte superior de la misma se encuentran protuberancias que forman una especie de lima la cual al entrar en contacto con el abdomen del insecto se generan las diferentes actividades acústicas del insecto, y como se aprecia en la figura 2B comparte similitud con la morfología del *Ataenius erratus* obtenida a través de la literatura, donde se detalla que fue determinada mediante la implementación de microscopía electrónica de barrido.

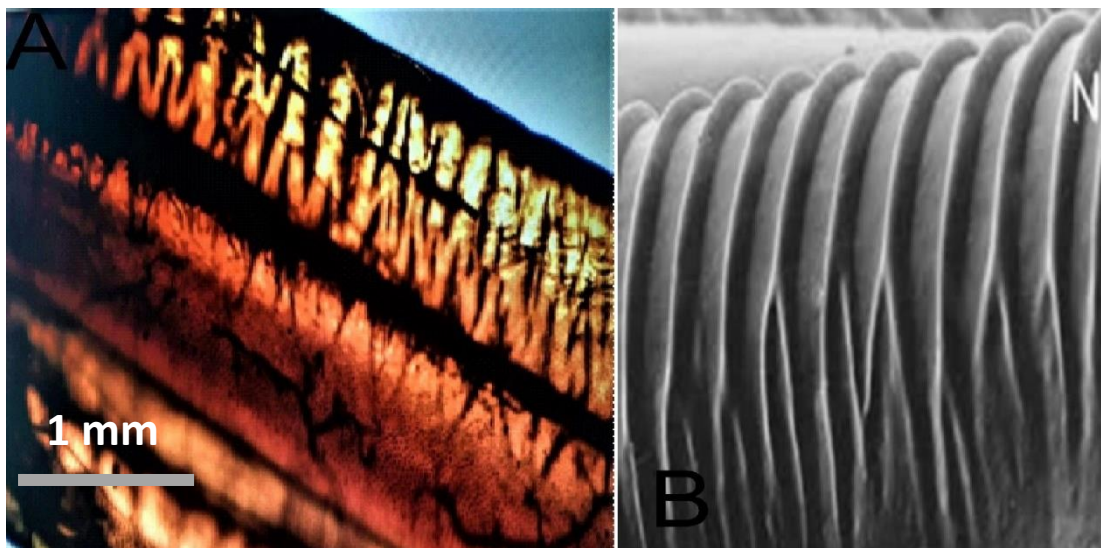


Figura 2. A) Macroestructura en forma de lima presente en el borde del ala del insecto "*Platycoelia*" obtenida por microscopía óptica (Lente 4X) B) Macroestructura Simétrica presente en el borde del ala del insecto *Ataenius erratus* obtenida por Microscopía de Barrido en la literatura.

En la figura 3, se pueden identificar vellosidades a lo largo de la membrana del ala del insecto con una extensión aproximada de entre 15 y 10 μm , así mismo se identificaron ciertas protuberancias, compartiendo similitud estructural con las alas de la cigarra que están descritos en los resultados obtenidos por Watson, Myhra, Cribb & Watson los cuales establecen que la función de estos relieves es la de aumentar la hidrofobicidad de la membrana a través de un efecto geométrico similar a la de un loto, lo cual sugiere que al igual que las cigarras la nanoestructura de las alas del *Platycoelia* ayuda a que éstas posean ciertas características de interés para la biomimética como la resistencia al agua y que pueden ser autolimpiables, por lo que se infiere que estas características pueden ser las responsables de permitirles volar sin inconvenientes durante las estaciones lluviosas [13].

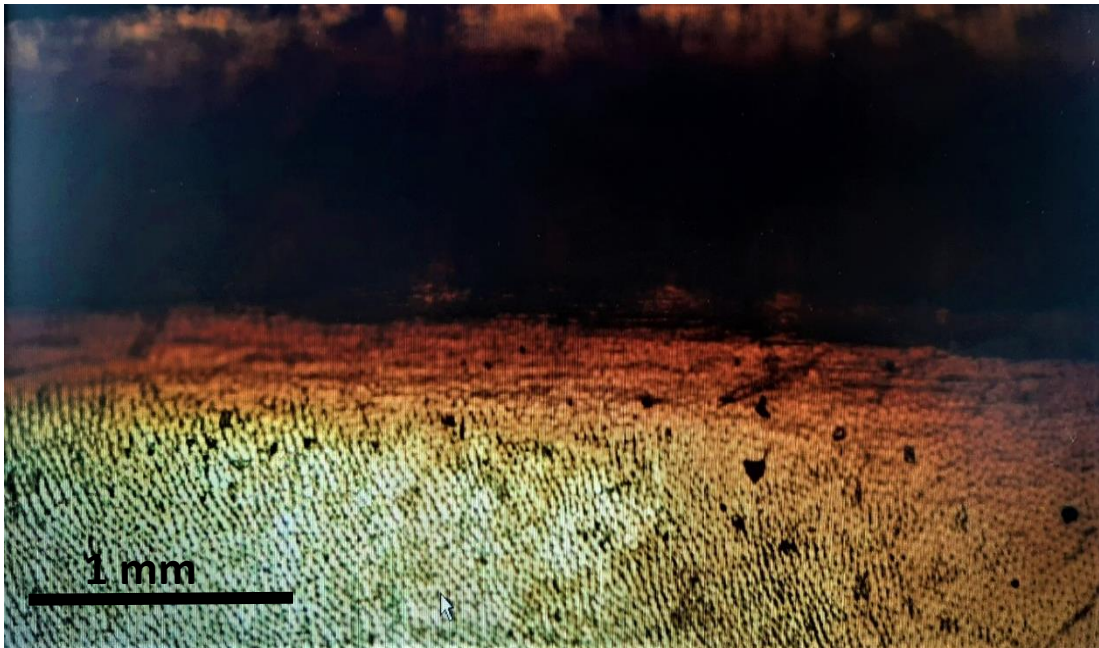


Figura 3. Caracterización macroscópica de la membrana del ala del Catzo Andino.

3.2 Estructura periódica macroscópica identificada en el ala del Catzo *Platycoelia*

En la imagen obtenida mediante microscopía óptica se puede identificar una cierta periodicidad a escala macroscópica, para lo cual fue necesario el procesamiento de la imagen digitalizada mediante el software “Gwyddion”, con finalidad de obtener el perfil de la estructura de interés basándose en los píxeles y colores de ésta mediante la

aplicación del modo de ilustración, la cual consiste en la detección de los bordes o también denominada orillas las cuales son resaltadas en colores Blanco-negro, para consiguiente comparar pixel a pixel con los de su alrededor, para lo cual finalmente si el pixel forma parte de la orilla o tiene un pico a una altura determinada en la estructura se asigna el color blanco, de otro modo se asigna el color negro, dando como resultado la figura 4a [24].

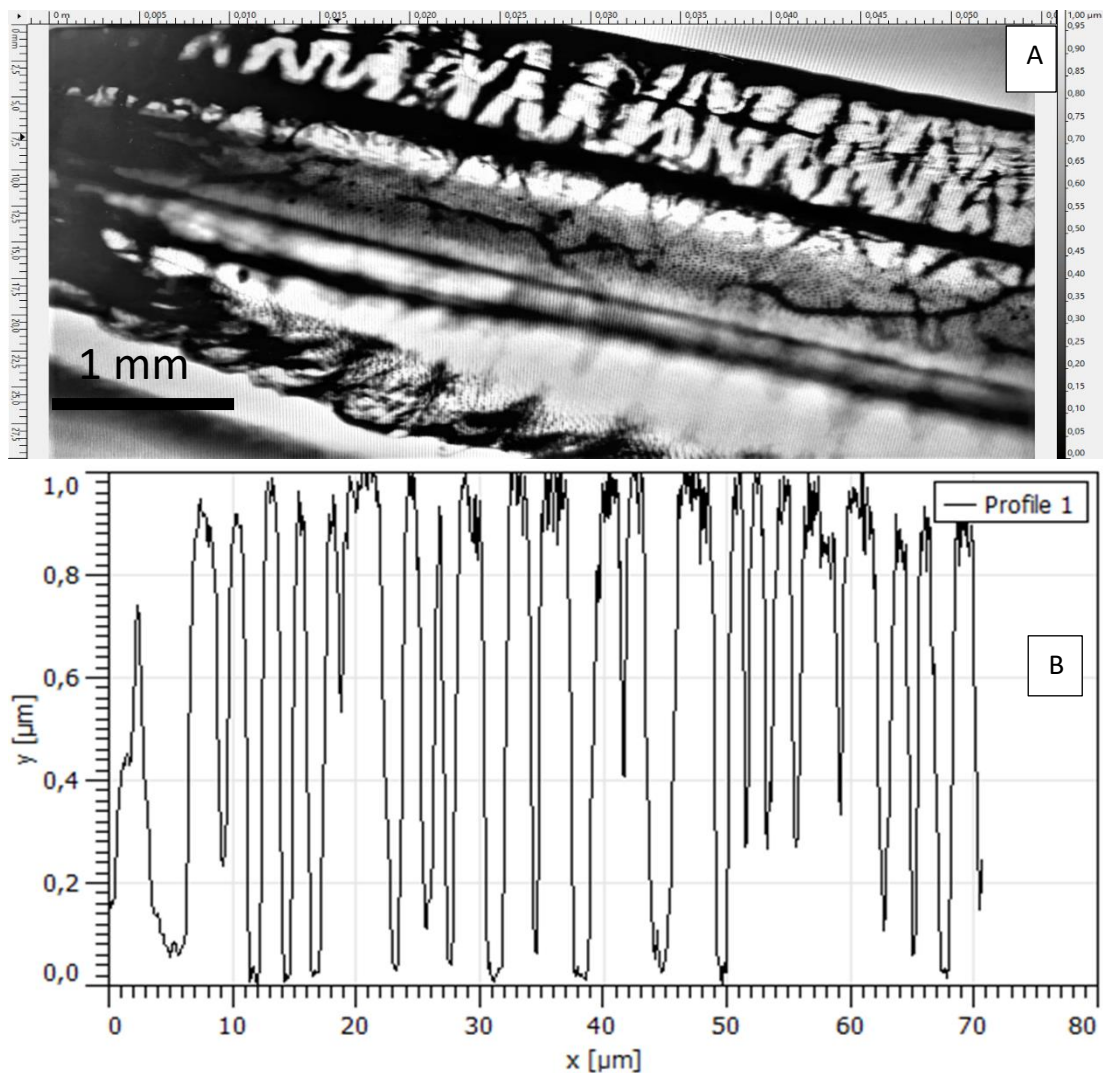


Figura 4. A) Imagen procesada digitalmente del borde del Ala mediante el programa Gwyddion B) Perfil estructural macroscópico de las alas del catzo andino.

En la figura 4b, se puede apreciar el perfil obtenido de la línea 1 en la imagen digitalizada que ayuda a identificar los detalles estructurales de la matriz de las alas del Catzo andino, en la cual se identificó que la altura de la parte superior del pico

hasta la base o valle se encuentra en un rango de $0,7$ a $1 \mu\text{m}$, además de poseer un espaciado constante de aproximadamente $5 \mu\text{m}$ entre frecuencias correspondientes a las longitudes de onda, además que se presenta un cierto grado de periodicidad de acuerdo con las transformadas rápidas bidimensionales de Fourier que se identifican en la figura 5, sin embargo, la periodicidad identificada no es tan pronunciada en la estructura del ala por lo que se infiere que el insecto a través de cientos de años de evolución ha podido desarrollar esta macroestructura como mecanismo para evitar pérdidas en la integridad de su estructura, que puede causar el movimiento periódico de las alas, ya que al inducir vibraciones por rozamiento se produce un mayor desgaste y la formación de estructuras no deseadas sobre las superficies que se someten al rozamiento como estrías o grietas, dando como resultado una posible macroestructura que puede ser utilizada como una solución para los problemas presentes en la tecnología de rozamientos [28].

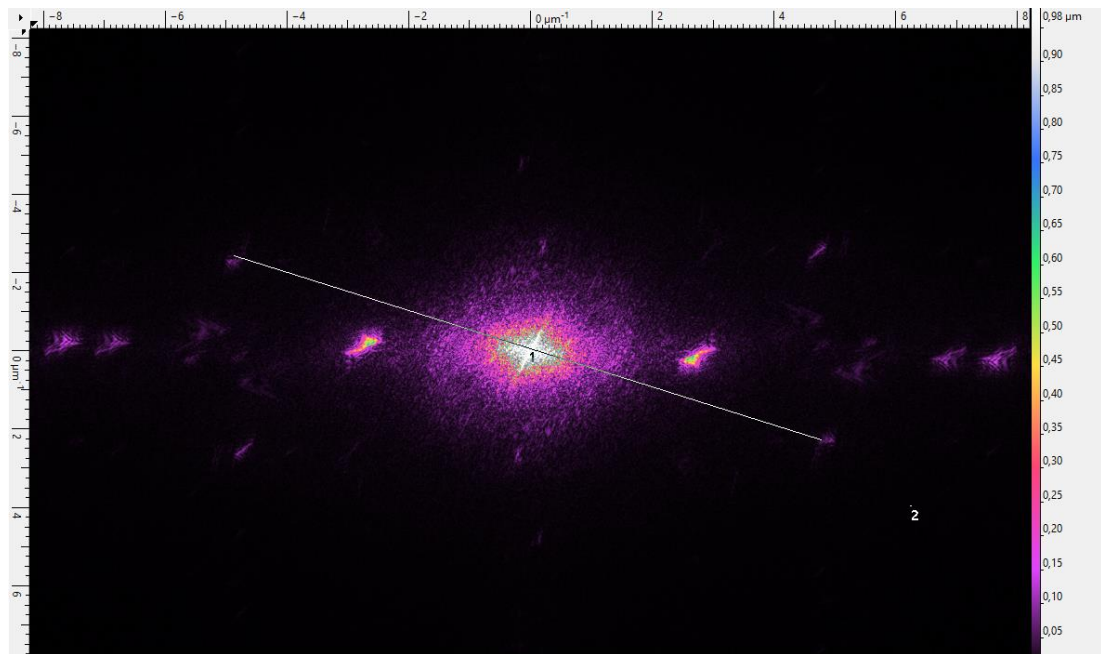


Figura 5. Transformada Rápida Bidimensional de Fourier del borde del ala del Catzo.

3.3 Caracterización nanoscópica del borde de las alas del catzo andino “*Platycoelia*” Mediante AFM.

Para la caracterización nanoscópica de la estructura del ala del insecto *Platycoelia* se utilizaron técnicas de mapeo mediante la implementación de microscopia de fuerza atómica, con la finalidad de establecer las diferentes propiedades nanomecánicas de las protuberancias identificadas mediante el uso del microscopio óptico, para lo cual fue necesario el análisis de varias secciones del ala. Sin embargo, aquí solo se presentan algunos de los resultados más representativos, como es el borde del ala como se identifica en la Figura 6.

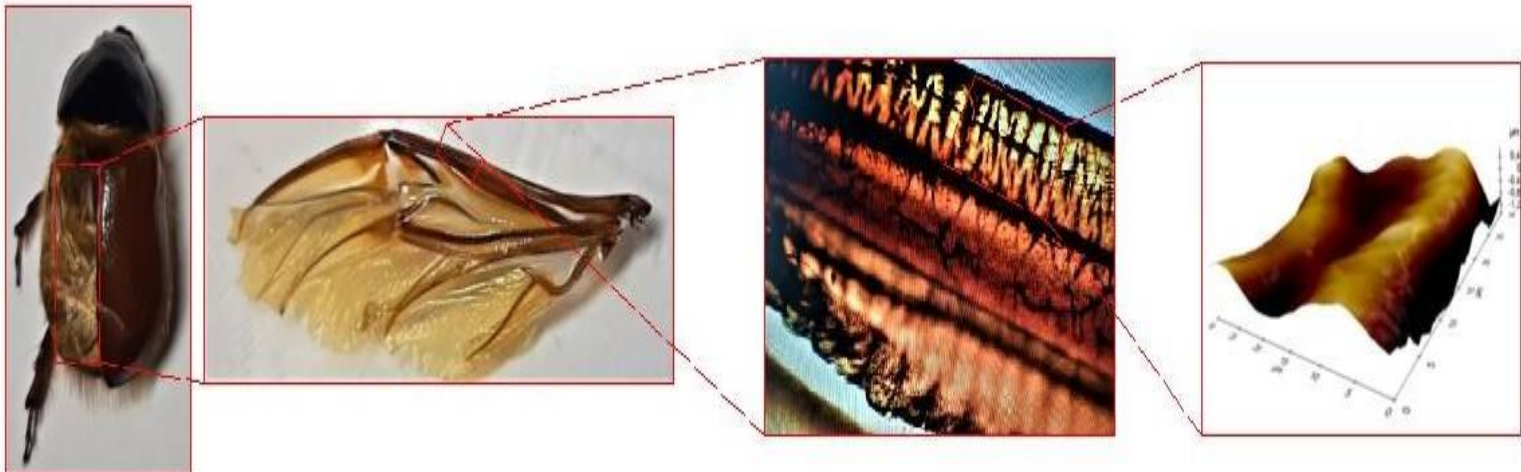


Figura 6. Secciones analizadas mediante microscopia óptica y de Fuerza Atómica

En la figura 7a, se puede apreciar una imagen obtenida mediante AFM de la topografía de un ala del catzo *Platycoelia*, así como el perfil de altura de la sección analizada en la figura 4b las cuales proporcionan dimensiones físicas que ayudan a describir la superficie de la sección del ala medida con la finalidad de revelar una posible periodicidad a nanoescala identificada.

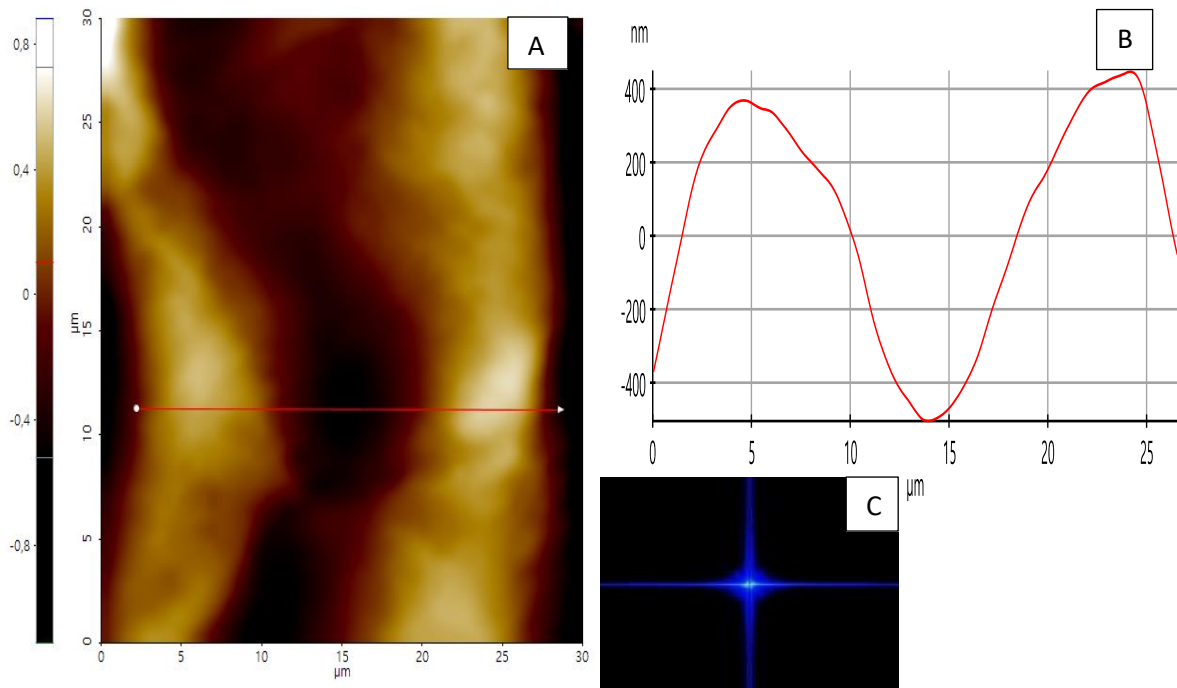


Figura 7. A) Caracterización topografía del borde del Ala de *Platycelia* Mediante AFM. B) Perfil estructural nanoscópica. C) Transformada Rápida Bidimensional de Fourier.

En la figura 7b, en la cual se muestra la relación de altura y ancho de la sección superior del ala en donde se presenta ciertas asimetrías morfológicas tanto a microescala como nanoescala, para la obtención de la imagen de resolución de 512x512 píxeles de la topografía fue necesario realizar una medición de un área aproximadamente de $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ y una velocidad de escáner de 1 Hz, esto con la finalidad de evitar errores durante las mediciones ya que al aumentar el tamaño del área a medir se generaron alteraciones en la punta del AFM debido a su estructura pronunciada. Sin embargo, esta estructura no presenta periodicidad a nanoescala como se puede identificar en la figura 7c mediante transformada rápida bidimensional de Fourier, por lo que ésta nanoestructura identificada en el borde del ala no llega a causar un control de fricción distinto sobre la estructura a macroescala del ala del insecto. Sin embargo, no se han identificado otras estructuras responsables de las vibraciones que produce el insecto durante la época de apareamiento, presumiendo que sean generadas únicamente por las diferentes irregularidades presentes a macroescala [29].

Posteriormente, se realizaron mediciones en otras secciones del borde del ala del insecto con la finalidad de identificar incongruencias y similitudes entre perfiles, para lo cual fue necesario disminuir la velocidad de escáner a 0,7 Hz para evitar fallos

durante la medición debido a la estructura y relieves, en donde se determinó que toda la estructura del ala del insecto comparte características similares, ya que en ambas secciones (Figura 7b y 8b) se puede identificar una variación entre sus alturas de entre -0,903 y 0,402 ; y de entre -0,824 y 0,304 μm , respectivamente. Además, que no se encontraron grandes diferencias en su topografía, siendo que su variación entre las mediciones puede deberse a posibles contaminaciones o ruido durante la medición mediante AFM [30].

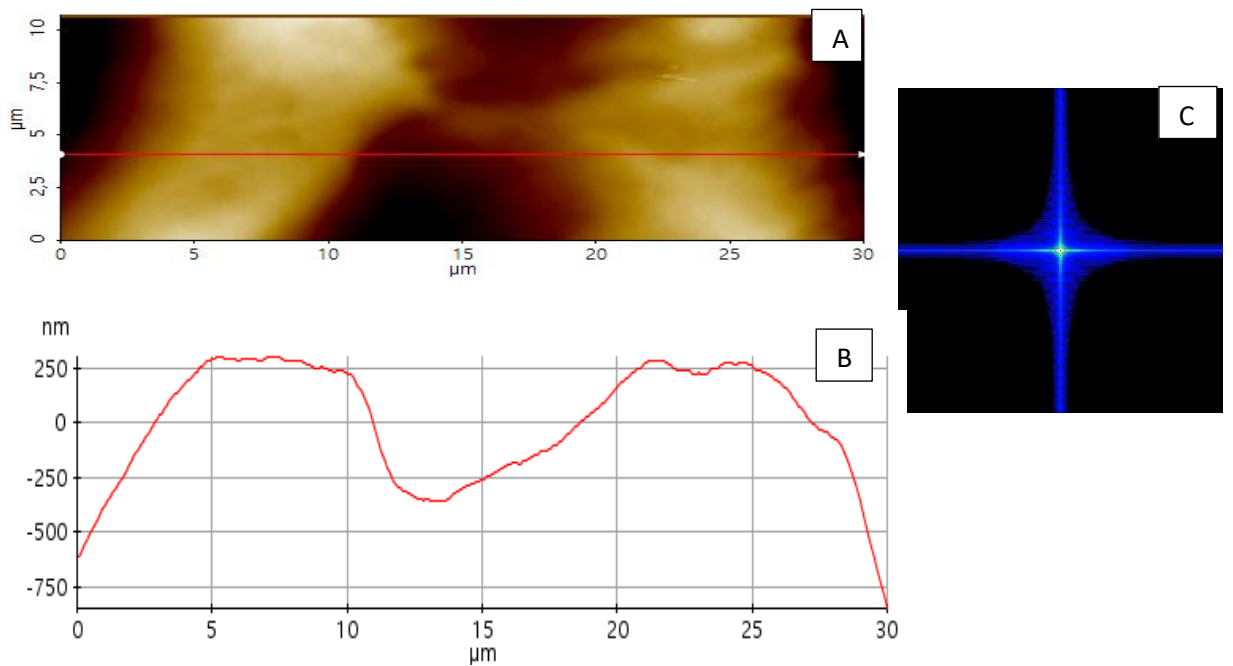


Figura 8. A) Caracterización topografía del borde del Ala de *Platycelia* Mediante AFM. B) Perfil estructural nanoscópica. C) Transformada Rápida Bidimensional de Fourier.

Así mismo, esta sección de la nanoestructura del borde del ala se sometió a la transformada rápida bidimensional de Fourier en donde se identificó que, al igual que la sección analizada previamente no presenta ninguna estructura periódica responsable de la generación de vibraciones mediante rozamiento, por lo que se presume que el sistema que el insecto ha desarrollado para evitar el desgaste de su estructura es causado gracias a la ligera periodicidad encontrada en la macroestructura del borde del ala.

3.4 Caracterización nanoscópica de la membrana de las alas del catzo andino “*Platycoelia*” Mediante AFM.

Para escanear las diferentes secciones de la membrana de las alas del catzo, se amplió el rango de medición a $50 \times 50 \mu\text{m}^2$, ya que ésta parte del insecto, al poseer una estructura más uniforme y sin relieves pronunciados, como los identificados en el borde de ésta, disminuye considerablemente la posibilidad de errores durante la medición, con la intención de identificar posibles nanoestructuras que ayuden a *Platycoelia* a desarrollar diferentes propiedades como la baja adherencia (muy importante para mantener la baja hidrofobicidad de las alas), a otorgarles características de interés como que éstas puedan llegar a ser autolimpiables y carezcan de contaminaciones que puedan llegar a afectar el vuelo.

En la figura 9 obtenida con una resolución de 512×512 píxeles y una velocidad de escaneo de 1 Hz, como se aprecia en el perfil de la imagen digitalizada (Figura 10a) en la cual se puede identificar que la estructura posee longitudes de onda de aproximadamente $8 \mu\text{m}$, además de picos máximos superiores a los presentados en el borde del ala de aproximadamente $0,900 \mu\text{m}$, así como una altura media de $0,258 \mu\text{m}$ entre picos, lo que comparten similitud con la estructura de la membrana de las alas de la mosca de vinagre (*Drosophila melanogaster*) los cuales según los estudios

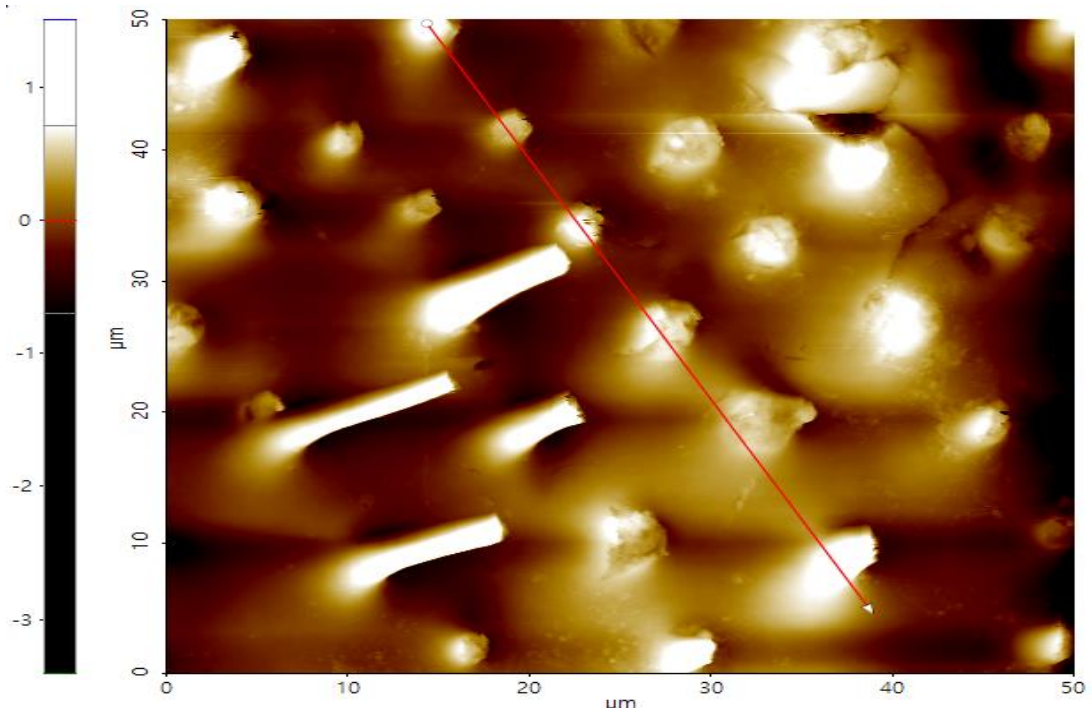


Figura 9. Caracterización Topográfica de la membrana superficial del ala del insecto "*Platycoelia*"

publicados por Watson, G. , Myhra, S., Cribb, B & Watson, J poseen protuberancias de aproximadamente $1 \mu\text{m}$ de altura y $1 \mu\text{m}$ de diámetro, por lo que se presume que las alas del Catzo al igual que los de la cigarra poseen una superficie hidrofóbica.

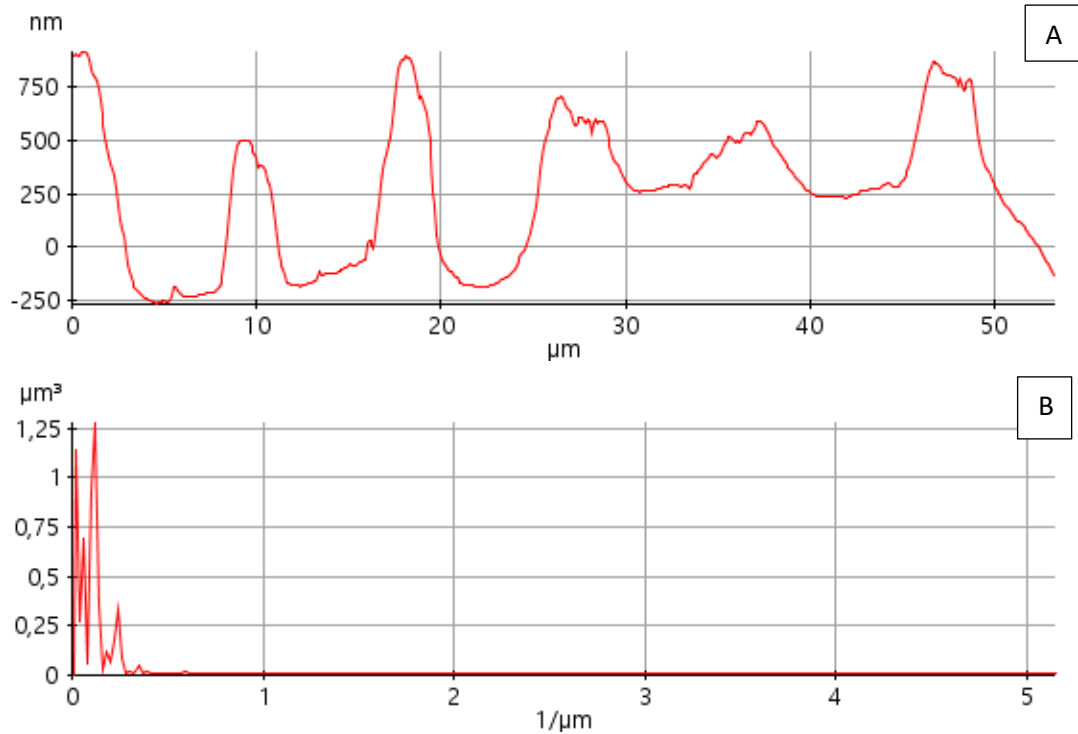


Figura 10. A) Perfil estructural nanoscópica de la membrana superficial de las alas de *Platycolia*.
B) "Power Spectrum" de la muestra del ala.

Además, mediante el análisis del "Power Spectrum" (Figura 10) se podría inferir la existencia de periodicidad en su estructura ya que se puede apreciar la presencia de picos los cuales representan las diferentes intensidades de los componentes de la frecuencia existente en la línea seleccionada, en donde el eje X representa la frecuencia de la sección de interés y la unidad se la representa con $1/\mu\text{m}$, mientras que el eje Y es la intensidad del componente de frecuencia con una unidad de μm^3 [31].

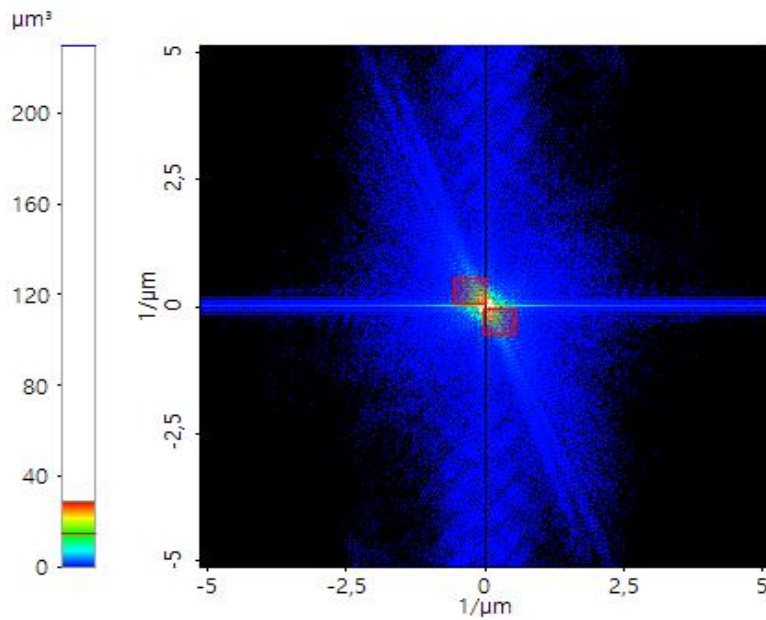


Figura 11. Transformada Rápida Bidimensional de Fourier de la membrana del ala del catzo "Platycoelia"

Posteriormente, se procedió a realizar la transformada bidimensional rápida de Fourier en la cual se puede apreciar la existencia de una ligera periodicidad en su estructura (figura 11) debido a que las frecuencias existentes en la FFT de las protuberancias de la membrana del ala se encuentran muy cercano al origen, por lo que se presume que estas nanoestructuras ayudan al aumento de la hidrofobicidad ya que según la teoría de Wenzel la cual detalla que cuando ciertas gotas de líquido como el agua se ubica encima de estas superficies que están compuesta por protuberancias y una cierta periodicidad, el líquido únicamente llenará los espacios vacíos del ala lo cual refuerza sus propiedades hidrofílicas y altamente hidrófobas, dando como resultado una relación directamente proporcional entre la periodicidad y la hidrofobicidad [32].

CAPITULO IV

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

4.1 Conclusiones

Se extrajeron las alas del insecto andino “*Platycoelia*” de manera que se mantenga intacta su estructura, en la cual, posteriormente a su a caracterización mediante microscopía óptica, se identificó la presencia de venas que se encuentran por todo el largo la superficie del ala del catzo, así también ciertas vellosidades en la membrana las cuales además de su función de barrera sobre el paso del aire para proporcionar una elevación estable durante el vuelo, se infiere que es la responsable de otorgar cierto nivel de hidrofobicidad que le permite contar con propiedades de interés como de ser autolimpiables y poseer baja adherencia a la contaminación ambiental.

Se estableció mediante la aplicación del Microscopio de Fuerza Atómica la topografía tridimensional del borde del ala del insecto así como de la membrana de ésta, en la cual se identificaron estructuras similares, en donde se reconoció la presencia de ciertas protuberancias en la membrana del ala, lo que se sugiere que podrían ser las responsables de otorgar al insecto un cierto nivel de hidrofobicidad brindándole propiedades de resistencia ante la contaminación ambiental, asemejándose a las alas de la mosca del vinagre.

A través de la Transformada Rápida Bidimensional de Fourier, se identificó la presencia de una ligera periodicidad a nivel macroestructural en el borde del ala responsable de la generación de vibraciones mediante el rozamiento con el abdomen del insecto, sin embargo, a nanoescala no se ha encontrado una periodicidad similar por lo que se presume que la nanoestructura no llega a causar un control de fricción distinto sobre la estructura a macroescala del ala del insecto.

Se determinó, mediante transformada rápida bidimensional de Fourier, que las protuberancias de la membrana del ala poseen un cierto grado de periodicidad lo que, según la teoría de Wenzel, implica que posiblemente esta estructura sea la responsable de la hidrofobicidad de las alas del insecto, y que ésta propiedad se deba en gran parte a las características mecánicas que el insecto ha desarrollado a través de millones de años de evolución, y que pueda llegar a ayudar en gran medida al descubrimiento de nuevos materiales biomiméticos.

4.2 Recomendaciones.

Realizar un estudio de factibilidad sobre la producción de diferentes materiales biomiméticos basados en las macro y nanoestructuras identificadas en la presente investigación mediante la implementación de la técnica Focused Ion Beam (FIB), el cual se basa en la aplicación de iones focalizados y que actualmente es utilizado en la industria de semiconductores, ciencias de materiales y ablación de materiales.

Determinar la composición de las alas del catzo andino "*Platycoelia*", mediante la implementación de cromatografía de capa fina de alto rendimiento con la finalidad de identificar posibles compuestos de interés que ayuden en la fabricación de nuevos materiales biomiméticos con baja adhesividad.

BIBLIOGRAFÍA

1. Smith, A. B., & Paucar C, A. (2000). Taxonomic review of *Platycoelia lutescens* (Scarabaeidae: Rutelinae: Anoplognathini) and a description of its use as food by the people of the Ecuadorian highlands. *Annals of the Entomological Society of America*, 93(3), 408-414.
2. Tipán Morales, D. P. (2020). *Abundancia estacional del Catzo Blanco (Platycoelia lutescens Blanchard) en el Área de Recreación La Cocha, Sector Tréboles del Sur, Parroquia Quitumbe, Cantón Quito* (Bachelor's thesis, Universidad Estatal Amazónica).
3. Velsateguá, C., Batallas, K., Hidalgo, A., & Ll, E. M. (2020). Determinación proximal de los componentes nutricionales y caracterización del tipo de ácidos grasos en el contenido lipídico del catzo (*Platycoelia lutescens*). *infoANALÍTICA*, 8(1), 113-125.
4. Hernández, A. G., & Karthik, T. V. K. (2018). Microscopía de fuerza atómica para el análisis de materiales. *TEPEXI Boletín Científico de la Escuela Superior Tepeji del Río*, 5(10).
5. García, Adriana, & Kikut Cruz, Karina. (2020). Microscopía de fuerza atómica como herramienta en la investigación de asfaltos. *Infraestructura Vial*, 22(40), 20-27. <https://dx.doi.org/10.15517/iv.v22i40.42057>
6. Limache, Y & Marisa, R (2020). Estudio mediante microscopia de fuerza atómica conductivo de capas delgadas de GaSb dopado con vanadio. *Unmsm.edu.pe*.
<https://doi.org/https://hdl.handle.net/20.500.12672/15458>

7. Rocciaa, B., Preidikman, S., & Gebhardt, C. (2008). Biomimética del Vuelo: Simulaciones Numéricas de la Cinemática de Alas Batientes. CAIA.
8. Lozano, J. (2006). ENTOMOLOGÍA MORFOLOGÍA Y FISIOLOGÍA DE LOS INSECTOS. Colombia: universidad nacional de Colombia. Recuperado de: <http://www.bdigital.unal.edu.co/39805/1/6366273.2014.pdf>
9. Wagner, R., Pittendrigh, B. R., & Raman, A. (2012). Local elasticity and adhesion of nanostructures on *Drosophila melanogaster* wing membrane studied using atomic force microscopy. *Applied surface science*, 259, 225-230.
10. Xiang, J., Du, J., Li, D., & Zhen, C. (2016). Functional morphology and structural characteristics of wings of the ladybird beetle, *Coccinella septempunctata* (L.). *Microscopy research and technique*, 79(6), 550-556.
11. Heuer, A. H., Fink, D. J., Laraia, V. J., Arias, J. L., Calvert, P. D., Kendall, K., ... & Thompson, D. H. (1992). Innovative materials processing strategies: a biomimetic approach. *Science*, 255(5048), 1098-1105.
12. Hasan, J., Roy, A., Chatterjee, K., & Yarlagadda, P. K. (2019). Mimicking insect wings: The roadmap to bioinspiration. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 5(7), 3139-3160.
13. Watson, G. S., Myhra, S., Cribb, B. W., & Watson, J. A. (2008). Putative functions and functional efficiency of ordered cuticular nanoarrays on insect wings. *Biophysical Journal*, 94(8), 3352-3360.

14. Watson, G. S., & Watson, J. A. (2004). Natural nano-structures on insects—possible functions of ordered arrays characterized by atomic force microscopy. *Applied surface science*, 235(1-2), 139-144.
15. Wagner, R., Pittendrigh, B. R., & Raman, A. (2012). Local elasticity and adhesion of nanostructures on *Drosophila melanogaster* wing membrane studied using atomic force microscopy. *Applied surface science*, 259, 225-230.
16. Rocha Rangel, Enrique, & Rodríguez García, José Amparo, & Martínez Peña, Enrique, & López Hernández, Juan (2012). Biomimética: innovación sustentable inspirada por la naturaleza. *Investigación y Ciencia*, 20(55),56-61.[fecha de Consulta 9 de Diciembre de 2021]. ISSN: 1665-4412. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=67424409007>
17. Muñíz, R. (2017). Biomimética. Herramientas de diseño inspiradas en la naturaleza. *Tekhné*, 20(2).
18. Casado, S. (2017). Studying friction while playing the violin: exploring the stick–slip phenomenon. *Beilstein journal of nanotechnology*, 8(1), 159-166
19. Ruiz, E. A. P., & Hernández, L. N. (2008). Estudio del contacto entre un penetrador rígido y una probeta de aluminio considerando carga normal y desplazamiento tangencial usando el método de los elementos finitos. *Revista Iberoamericana De Ingeniería Mecánica*, 12(1), 15-23.66

20. Arnaldos, M. I., Romera, E., García, M. D., & Luna, A. (2001). Protocolo para la recogida, conservación y remisión de muestras entomológicas en casos forenses. *Cuadernos de Medicina Forense*, 25, 65-73.
21. Ricardo, A., & López, María Carolina. (2017). Morfología externa de insectos. Unlp.edu.ar.
<https://doi.org/http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/72818>
22. Dabirian, R., Wang, W. M., Loza Matovelle, D., & Hwu, E. T. (2015). Sistema de microscopía de fuerza atómica basada en una unidad de lectura óptica digital y un escáner-zumbador. *Rev. mex. fis*, 238-244.
23. Franco, M. A. (2008). Nanoindentación basada en espectroscopia de fuerzas con un microscopio de fuerza atómica. *Ingeniería y Ciencia*, 4(8), 85-98.
24. Elizondo, J. E., & Maestre, L. P. (2005). Fundamentos de procesamiento de imágenes. *Mexicali: Universidad Autónoma de Baja California*.
25. Xie, H., Haliyo, DS y Régnier, S. (2009). Un microscopio de fuerza atómica versátil para nanomanipulación y nanoensamblaje tridimensionales. *Nanotecnología*, 20 (21), 215301.
26. Cassagnes, A., Lutenberg, A., & Zacchigna, F. G. (2016). Implementacion y analisis de algoritmos de cálculo de Transformada Rapida de Fourier para su aplicacion en sistemas OFDM. *Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires. Obtenido de <http://laboratorios.fi.uba.ar/lse/tesis/LSE-FIUBA-Tesis-Grado-Andres-Cassagnes-2016.pdf>*.
27. Kasper, J., & Hirschberger, P. (2005). 31 Vibratory Communication in Dung Beetles (Scarabaeidae, Coleoptera). *Insect Sounds and Communication: Physiology, Behaviour, Ecology, and Evolution*, 405.

28. Popov, Valentin L. Principios y aplicaciones de la mecánica de contacto en tribología, fricción y adherencia. Sant Vicent del Raspeig: Publicacions de la Universitat d'Alacant, 2020, 434 p.
<https://doi.org/10.14198/pua.2020.meccon>
29. Apicella, B., Bruno, A., Wang, X., & Spinelli, N. (2013). Fast Fourier Transform and autocorrelation function for the analysis of complex mass spectra. *International Journal of Mass Spectrometry*, 338, 30-38.
30. Gadelmawla, E. S., Koura, M. M., Maksoud, T. M., Elewa, I. M., & Soliman, H. H. (2002). Roughness parameters. *Journal of materials processing Technology*, 123(1), 133-145.
31. Pfander, G. E., & Benedetto, J. J. (2002). Periodic wavelet transforms and periodicity detection. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 62(4), 1329-1368.
32. Sun, M., Watson, G. S., Zheng, Y., Watson, J. A., & Liang, A. (2009). Wetting properties on nanostructured surfaces of cicada wings. *Journal of Experimental Biology*, 212(19), 3148-3155.