



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

# LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad  
Morelia

Efectos de ventarrones en la estructura del  
dosel en la Reserva de la Biosfera de la  
Mariposa Monarca

# T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADA EN CIENCIAS AMBIENTALES

P R E S E N T A

GLORIA OLIMPIA MERAZ CHINO

DIRECTOR DE TESIS: DR. DIEGO RAFAEL PÉREZ SALICRUP

MORELIA, MICHOACÁN

AGOSTO, 2020



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

# LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad  
Morelia

Efectos de ventarrones en la estructura del  
dosel en la Reserva de la Biosfera de la  
Mariposa Monarca

# TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADA EN CIENCIAS AMBIENTALES

P R E S E N T A

GLORIA OLIMPIA MERAZ CHINO

DIRECTOR DE TESIS: DR. DIEGO RAFAEL PÉREZ SALICRUP

MORELIA, MICHOACÁN

AGOSTO, 2020



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES, UNIDAD MORELIA  
SECRETARÍA GENERAL  
SERVICIOS ESCOLARES

**MTRA. IVONNE RAMÍREZ WENCE**  
DIRECTORA  
DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
**PRESENTE**

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 01** del **Comité Académico** de la Licenciatura en Ciencias Ambientales de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Unidad Morelia celebrada el día **30 de enero del 2020**, acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional del alumno (a) **Gloria Olimpia Meraz Chino** de la Licenciatura en **Ciencias Ambientales**, con número de cuenta **108002984**, con la tesis titulada: **"Efectos de ventarrones en la estructura del dosel en la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca"**, bajo la dirección como **tutor** del Dr. Diego Rafael Pérez Salicrup.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

**Presidente:** Dr. Luis Miguel Morales Manilla  
**Vocal:** Dra. María Isabel Ramírez Ramírez  
**Secretario:** Dr. Diego Rafael Pérez Salicrup  
**Suplente:** Dr. José de Jesús Alfonso Fuentes Junco  
**Suplente:** Dr. Miguel Ángel Salinas Melgoza

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Morelia, Michoacán a 27 de julio del 2020.

**DRA. YESENIA ARREDONDO LEÓN**  
**SECRETARIA GENERAL**

**CAMPUS MORELIA**

Apartado Postal 27-3 (Santa Ma. De Guido), 58090, Morelia, Michoacán  
Antigua Carretera a Pátzcuaro N° 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta  
58190, Morelia, Michoacán, México. Tel: (443)689.3500 y (55)56.23.73.00, Extensión Red UNAM: 80614  
[www.enesmorelia.unam.mx](http://www.enesmorelia.unam.mx)

## **AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES**

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) ya que a través de la licenciatura en Ciencias Ambientales tuve la oportunidad de formarme en la Escuela Nacional de Estudios Superiores, Campus Morelia (ENES, Unidad Morelia), en el Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES) y en el Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA). Sobre todo, agradezco a los profesores, investigadores, estudiantes y compañeros que me acompañaron en el proceso.

Al Laboratorio de Ecología y Manejo de Recursos Forestales cuyo responsable es el Dr. Diego Rafael Pérez Salicrup, por proporcionarme el espacio y los recursos para desarrollar mi proyecto de tesis.

A los responsables de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM), por otorgarnos el permiso para realizar el levantamiento de información dentro de la reserva. Así mismo a los trabajadores de la reserva y ejidatarios que nos acompañaron a campo.

A mi comité sinodal; al Dr. Luis Miguel Morales Manilla, la Dra. María Isabel Ramírez Ramírez, el Dr. José de Jesús Fuentes Junco y al Dr. Miguel Ángel Salinas Melgoza, por sus valiosas aportaciones y asesoramiento para este trabajo.

Al proyecto PAPIIT – UNAM 2016-2017 (N209716) “Sinergias de disturbios naturales y humanos en bosques montanos en el oriente de Michoacán”, por proporcionar financiamiento para la realización de esta tesis.

## **AGRADECIMIENTOS PERSONALES**

A mi familia. Los quiero tanto.

A mis tías, tíos, primas, primos. A mis tías Ade, Juanita y Emma, que me cuidan y me motivan siempre, especialmente a mi tía Ade, gracias por tanto apoyo al inicio de mi licenciatura. A ese otro lado de la familia, mis amigos. A Sele y a Yael, que a la distancia siguen creciendo conmigo. A Dani, Pao, Eve y Javi, gracias por todas las experiencias de esta etapa, por acompañarme y apoyarme siempre. Sobre todo, por su amistad tan bella, a Xime. Y porque pasamos –casi– todo juntas. A Polo, por cuidarnos, ayudarnos y alegrarnos siempre. A Luis, por cuidarme, por ser apoyo y –a veces– guía en este proceso final tan caótico.

No podría agradecerle a nadie tanto, como a mis padres Soledad y Samuel. Por ayudarme a ser quien soy, al ser guía, apoyo y amor incondicional siempre. Gracias por esta oportunidad de estar y estudiar lejos de casa, ha sido difícil, pero ha valido la pena. Aprendí y crecí muchísimo. Gracias por estar al pendiente de mí y cuidarme tanto. Por heredarme su gusto por la ciencia y por ser motivación e inspiración para mi vida. Gracias por la paciencia, ¡lo logramos!

A mi asesor, el doctor Diego. Gracias por la confianza y la oportunidad para trabajar contigo. Por llevarme y mandarme a campo, por prestarme el equipo –sobre todo por confiar en que no iba a estrellar el dron– y por dedicarme tiempo. Gracias por las enseñanzas científicas y la guía académica proporcionada. Por las pláticas. Por el trato que nos das a los miembros del laboratorio.

A mis compañeros de laboratorio. A nuestros compañeros que ya migraron: Katia, Leo, Alfredo y a David que me apoyó mucho para ir a campo. Todos en algún momento me ofrecieron apoyo, consejos y orientación para mi proyecto de tesis. Especialmente a Ruben, Alta, Karla y Diana, que ahora siento amigos... y sobre todo a Erika –y en su momento a Leo–, que al involucrarme en otros proyectos descubrí y trabaj(ar)é temas maravillosos.

A mis sinodales. Al Dr. Luis Miguel, que con su equipo de trabajo me enseñó a pilotear drones y me orientó en mi investigación. A la Dra. Isabel, que junto con Jairo me orientaron en el procesamiento e interpretación de mis imágenes. No fue sinodal, pero, por tu asesoría y material compartido: muchas gracias, Jairo. Al Dr. Jesús (Chucho), por ser un buen profesor durante la licenciatura y ser apoyo durante esta última etapa. Y, especialmente al Dr. Miguel (Mike) por ayudarme en los análisis estadísticos y orientarme en la redacción de este trabajo. Su apoyo, orientación y tiempo fue fundamental en la conclusión de mi proyecto.

Un reconocimiento especial a los encargados de la RBMM. A los directivos de la reserva: Felipe Martínez Meza y Rosalía Domínguez Vieyra, por compartirnos información y por permitirnos entrar a la reserva para obtener las imágenes. A los trabajadores, por acompañarnos a los sitios afectados. A los ejidatarios, por la autorización para ingresar a sus predios y por su guía y acompañamiento desinteresado. A todos los que me guiaron y acompañaron a campo, gracias por su tiempo y confianza.

Finalmente, a la comunidad de la ENES: investigadores, alumnos –particularmente mis compañeros–, al personal de servicios escolares que me orientaron durante las diferentes etapas de la licenciatura y muy importantes, mis profesores. Gracias por la formación.

**A mis padres, mi familia, mis amigos.**

**A Alex, que seguirá haciendo falta.**

**Permaneces como inspiración de pensamiento, ideales y resistencia.**

|  |    |
|--|----|
| <b>Índice</b>  |    |
| <b>Índice de figuras</b>   | 8  |
| <b>Índice de tablas</b>  | 9  |
| <b>Resumen</b>   | 10 |
| <b>Abstract</b>  | 12 |
| <b>Introducción</b>  | 14 |
| <b>Antecedentes</b>  | 22 |
| Objetivos  | 24 |
| <b>Materiales y métodos</b>  | 24 |
| Área de estudio  | 24 |
| Descripción del evento de disturbio  | 26 |
| Diseño de muestreo   | 25 |
| Procesamiento de imágenes y capas de información   | 27 |
| Interpretación de imágenes para categorías de cobertura  | 28 |
| Análisis estadísticos para describir la estructura del dosel en los sitios seleccionados   | 29 |
| Análisis estadísticos para explorar la influencia de la topografía en la estructura del dosel post-ventarrones                             | 29 |
| <b>Resultados</b>  | 30 |
| Densidad del dosel por sitios y por cobertura  | 30 |
| Medidas de tendencia central y medidas de dispersión y análisis de varianza de una vía por componentes arbóreos de la estructura del dosel | 31 |
| Influencia de la topografía en la caída de árboles por viento  | 32 |
| <b>Discusión</b>   | 34 |
| <b>Conclusiones</b>  | 43 |
| <b>Bibliografía</b>  | 46 |
| <b>Apéndice de tablas</b>  | 55 |
| <b>Apéndice de figuras</b>   | 57 |

**Índice de figuras**

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1.</b> Mapa de ubicación de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca con la localización de los centroides de los sitios sobrevolados | 57 |
| <b>Figura 2.</b> Densidad de árboles vivos por categorías de cobertura del dosel extrapolados a hectáreas   | 58 |
| <b>Figura 3.</b> Densidad de árboles muertos en pie por categoría de cobertura del dosel extrapolados a hectáreas                                 | 59 |
| <b>Figura 4.</b> Cantidad de árboles derribados por categoría de cobertura del dosel extrapolados a hectáreas                                     | 60 |
| <b>Figura 5.</b> Conteo de cuadros por categoría de cobertura del dosel por rangos de pendiente   | 61 |
| <b>Figura 6.</b> Conteo por categoría de cobertura del dosel por orientación de ladera  | 61 |
| <b>Figura 7.</b> Ortomosaico correspondiente al sitio sobrevolado en Sierra Chincua   | 62 |
| <b>Figura 8.</b> Mapa con la distribución de cuadros y su categoría de cobertura del dosel correspondiente a Sierra Chincua                       | 63 |
| <b>Figura 9.</b> Ortomosaico correspondiente al sitio sobrevolado en el Llano de las Papas  | 64 |
| <b>Figura 10.</b> Mapa con la distribución de cuadros y su categoría de cobertura del dosel correspondiente al Llano de las Papas                 | 65 |
| <b>Figura 11.</b> Ortomosaico correspondiente al sitio sobrevolado en el Ejido Casa Blanca  | 66 |
| <b>Figura 12.</b> Mapa con la distribución de cuadros y su categoría de cobertura del dosel correspondiente al Ejido Casa Blanca                  | 67 |
| <b>Figura 13.</b> Ortomosaico correspondiente al sitio sobrevolado en el Llano de los Conejos   | 68 |
| <b>Figura 14.</b> Mapa con la distribución de cuadros y su categoría de cobertura del dosel correspondiente al Llano de los Conejos               | 69 |
| <b>Figura 15.</b> Ortomosaico correspondiente al sitio sobrevolado en el Ejido Chincua  | 70 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 16.</b> Mapa con la distribución de cuadros y su categoría de cobertura del dosel correspondiente al Ejido Chincua              | 71 |
| <b>Figura 17.</b> Ortomosaico correspondiente al sitio sobrevolado en el Ejido San Jerónimo Pilitas                                       | 72 |
| <b>Figura 18.</b> Mapa con la distribución de cuadros y su categoría de cobertura del dosel correspondiente al Ejido San Jerónimo Pilitas | 73 |
| <b>Figura 19 y 20.</b> Material derribado y levantamiento de información espacial en Sierra Chincua, mayo/2017                            | 75 |
| <b>Figura 21 y 22.</b> Material derribado en el Ejido Chincua, enero/2019   | 75 |
| <b>Figura 23 y 24.</b> Levantamiento de información espacial y material fracturado en el Ejido San Jerónimo Pilitas, febrero/2019         | 75 |
| <b>Figura 25.</b> Material derribado en Sierra Chincua, mayo/2017   | 76 |
| <b>Figura 26.</b> Árbol desenraizado en el Ejido Chincua, enero/2019  | 76 |
| <b>Figura 27 y 28.</b> Material derribado y fracturado en el Ejido Chincua, enero/2019  | 76 |

### Índice de tablas

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 1.</b> Información de la adquisición de las fotografías   | 55 |
| <b>Tabla 2.</b> Caracterización espacial de los sitios sobrevolados  | 55 |
| <b>Tabla 3.</b> Superficie de cobertura del dosel por sitios (expresada en porcentajes)  | 56 |
| <b>Tabla 4.</b> Valores de <i>odd ratios</i> , intervalos de confianza y <i>p</i> para cada uno de los predictores del modelo de regresión logística ordinal | 56 |
| <b>Tabla 5.</b> Plantilla para la interpretación de la cobertura del dosel   | 74 |

## Resumen

Los disturbios son eventos que producen modificaciones en la trayectoria de procesos ecosistémicos, en distintos niveles ecológicos. Existen disturbios de origen natural por ventarrones, que son flujos atípicamente fuertes de viento. Pueden producir daños en la comunidad arbórea cuando la fuerza de arrastre excede la capacidad de flexión del tallo, el anclaje de las raíces o la resistencia de la corona de un árbol. El 9 de marzo del 2016, en la región de la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca (RBMM), se presentaron episodios de ventarrones atípicos como consecuencia de la tormenta invernal número 11 en sinergia con los frentes fríos 45 y 46. Sus efectos consistieron en la generación de más de una decena de hectáreas de claros en el dosel del bosque del área natural protegida. El objetivo principal de esta investigación consistió en evaluar los efectos de los ventarrones en la estructura del dosel y la generación de claros en bosques de coníferas de la reserva.

Utilizamos técnicas fotogramétricas para la evaluación de los efectos del disturbio. Un dron o un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) multirroto, facilita el vuelo sobre el terreno debido a su estabilidad en el aire. Caracterizar las modificaciones en el dosel del bosque luego de un evento de ventarrones, permite reconocer factores que intervienen en la respuesta del dosel arbóreo, aportando información para el manejo del bosque ante la ocurrencia de disturbios por viento.

Empleamos un dron para realizar seis vuelos entre mayo del 2017 y febrero del 2019, en sitios de la RBMM que fueron afectados por los ventarrones. Con las fotos se generaron ortomosaicos que se trabajaron en sistemas de información geográfica para su interpretación. Se caracterizó la cobertura del dosel en cinco categorías de cobertura (expresadas en porcentajes) y se obtuvo información de densidad de otras variables: árboles vivos, árboles derribados y árboles muertos en pie. Posteriormente, se sobrepusieron capas de pendientes y orientación de laderas, para explorar el vínculo entre los efectos de los ventarrones en la comunidad arbórea y la topografía.

Los resultados de este estudio muestran que la superficie en cada una de las categorías de cobertura difiere entre los diferentes sitios sobrevolados. Para la variable de árboles vivos, solo la categoría de cobertura de dosel más cerrada (71-100%) presentó diferencias significativas entre los sitios. Para la variable de árboles derribados, las categorías de cobertura presentaron diferencias significativas, con excepción de la categoría de 71-100%. Tampoco se encontró un patrón general en la presencia de árboles muertos en pie, ya que hubo diferencias significativas entre todos los sitios. En relación con la topografía, en las pendientes más elevadas se encontraron registros de espacios con mayor cobertura. Para la orientación de ladera, predominan los registros en pendientes orientadas al sur, seguidas por las orientadas hacia el oeste. Esto podría estar vinculado con la dirección del viento durante la tormenta.

La caída de ramas y árboles completos como resultado de los efectos de ventarrones fue heterogénea a través de la compleja topografía de la reserva. Sus efectos en el dosel pueden promover la creación de brechas y claros, producir desigualdad de edades entre individuos, e incluso el reemplazo de todo un rodal. Sin embargo, estudiar todos los efectos que produce un ventarrón con un dron es impráctico, pero puede ser una excelente herramienta para documentar los efectos de un evento de dicha magnitud.

## **Abstract**

Disturbances are events that produce modifications in the trajectory of ecosystem processes, at different ecological levels. One of these disturbances of natural origin are windthrows. They can cause damage to the tree community when the drag force exceeds the bending capacity of trees, the anchorage of roots, or the resistance of the crown of a tree. On March 9, 2016, in the region of the Monarch Butterfly Biosphere Reserve (MBBR), there were windthrows associated with winter storm number 11, in synergy with the cold fronts 45 and 46. They generated damage in several hectares of forest canopy in the protected natural area. The main objective of this research was to evaluate the effects of windthrows on the canopy structure and the generation of gaps in coniferous forests of the reserve.

We used photogrammetric techniques to assess the effects of this disturbance. A drone or a multi-rotor Unmanned Aerial Vehicle (UAV) facilitates flight above the ground due to its stability in the air. Characterizing the changes in the forest canopy after a windthrow event allows for the identification of factors that intervene in the response of the tree canopy, providing information for forest management when wind disturbances occur.

We used a drone to conduct six flights on different dates between May 2017 and February 2019, at sites at the MBBR that were affected by the windthrow. The images were used to generate ortho-mosaics that were worked on geographic information systems for their interpretation. Canopy cover was characterized in five categories (expressed as percentages) and we evaluated the density of living trees, felled trees, and standing dead trees. Subsequently, layers of information on slope and aspect were superimposed to explore the relationship between the effects of gales on the tree community and topography.

The results show that the area in each of these cover categories differed between sites. For living trees, only the most closed canopy cover category (71-100%) presented significant differences between sites. For fallen trees, all cover categories were differences across sites, except for canopy cover 71-100%. There was not a general pattern associated with the presence of standing dead trees since there

were significant differences between all sites. In relation to topography, patches with higher canopy cover were associated with more steep slopes. South and west-facing slopes were more frequent, possibly as a consequence of wind direction during the storm.

The fall of tree branches and complete trees as a result of the effects of gales was heterogeneous through the complex topography of the reserve. The effects on the canopy can promote the creation of gaps, and produce unequal age forest stands, and even the replacement of an entire stand. However, studying all the effects that a windstorm produce with a drone is impractical, but it can be an excellent tool to document the effects of an event of this magnitude.

## Introducción

Los disturbios son eventos relativamente discretos en el tiempo, que detonan modificaciones en la trayectoria de los procesos ecosistémicos (Pickett y White, 1985; Pickett *et al.*, 1989; Pickett *et al.*, 1999; Battisti *et al.*, 2016). Los disturbios pueden tener efectos en distintos niveles de organización ecológicos, desde los individuos hasta los ecosistemas, pasando por las poblaciones y las comunidades (Pickett y White, 1985) e incluso, pueden influir en otros componentes o procesos del ambiente (Battisti *et al.*, 2016). Para algunos ecosistemas hay muy poca información sobre los efectos y secuelas de los disturbios.

Los disturbios pueden ser de origen antropogénico o natural, y su ocurrencia temporal puede tener cierta regularidad. El origen de los disturbios naturales es producido por agentes biológicos o físicos, entre los que se encuentran los fenómenos meteorológicos (Calderon-Aguilera *et al.*, 2012).

Como consecuencia de los disturbios, los ecosistemas suelen pasar de un estado de apariencia estable a uno de recuperación y de cambio (Battisti *et al.*, 2016; Turner y Gardner, 2015). Pueden actuar como agentes de selección natural y de evolución biológica. Además, debido a las modificaciones que generan en el ambiente en el que habitan los organismos, impulsan y mantienen dinámicas ecosistémicas (Pickett *et al.*, 1989; Krebs, 2001 citado por Battisti *et al.*, 2016; Battisti *et al.*, 2016).

Los disturbios pueden ser descritos a partir de su régimen. Las propiedades del régimen de cualquier disturbio incluyen la intensidad, extensión y probabilidad de ocurrencia en función del tiempo y del espacio (Pickett *et al.*, 1999; Vaillancourt, 2008; Perera *et al.*, 2015). Sin embargo, es posible que modificaciones antropogénicas a los sistemas ecológicos cambien las propiedades de los regímenes de disturbio, ya sea amplificando componentes de su régimen, atenuándolos o eliminándolos (Manson *et al.*, 2009).

Estas alteraciones a los regímenes de disturbio, así como sinergias entre disturbios podrían generar daños no sólo en componentes bióticos del ambiente, sino también

en otros aspectos como lo son pérdidas socioeconómicas e impacto en servicios ecosistémicos (Dale *et al.*, 2001, Seidl *et al.*, 2017). Esto podría amenazar la integridad, permanencia y conservación de los ecosistemas (Attiwil, 1994; White y Jentsch, 2001; Calderon-Aguilera *et al.*, 2012; Battisti *et al.*, 2016).

En el caso de los disturbios naturales en bosques templados, Runkle (1985) enlista las siguientes propiedades de los regímenes de disturbio: la tasa de retorno, su distribución en el espacio y tiempo, la severidad, la tasa de recuperación del sistema luego del disturbio, así como la importancia de los episodios en los que se generan múltiples claros en el bosque.

El desarraigo de los árboles, su fractura, caída de troncos y ramas, así como las modificaciones que esto produce a nivel de paisaje, pueden ser efectos directos de eventos como los ventarrones (*windthrow* o *blowdown* en inglés). Los regímenes de los disturbios por viento pueden ser caracterizados por un conjunto de descriptores temporales, espaciales e intrínsecos al disturbio (Vaillancourt, 2008). Los rangos de valores de los componentes del régimen de disturbio por viento son muy variables entre diferentes ecosistemas, por lo que es importante no generalizar los descriptores de una región o ecosistema a otros (Vaillancourt, 2008).

La caída de árboles por ventarrones ocurre cuando la fuerza de arrastre inducida por el viento excede la flexión del tallo, el anclaje de las raíces o la resistencia de la corona de un árbol (Quine *et al.*, 1995; Oliver y Larson, 1996; Mitchell, 2012; Mitchell y Ruel, 2015). Por ello, las características del árbol determinan el momento en el que la velocidad del viento resulta en la fractura o el desarraigo del individuo (Quine *et al.*, 1995; Mitchel, 2012).

Además de las características individuales de los árboles, existen otros factores que afectan la respuesta del dosel a los ventarrones. Uno de ellos es la condición de la comunidad arbórea en términos de edad y estructura (Attiwil, 1994; Ionut y Bogdan, 2012; Mitchell, 2012). Otro factor es la topografía del terreno, es decir, la exposición del terreno al viento, el ángulo de la pendiente y el drenaje cóncavo del suelo. Estos atributos del terreno local pueden modificar directamente la dirección y velocidad

del viento (Quine *et al.*, 1995; Ruel *et al.*, 2002 citado por Mitchell y Ruel, 2015; Ionut y Bogdan, 2012), condiciones de las que dependen los efectos del disturbio.

También se considera como factor al suelo, ya que proporciona estabilidad y firmeza al anclaje de las raíces de los árboles por medio de la masa de suelo que se adhiere a las raíces, sobre todo en las pendientes pronunciadas (Quine *et al.*, 1995; Ionut y Bogdan, 2012). Otras cualidades del suelo que pueden influir en el efecto de los ventarrones sobre los árboles, son la fertilidad, tipo y clase de suelo, así como sus características y propiedades físicas que pudieran restringir o no el anclaje de las raíces (Quine *et al.*, 1995; Ionut y Bogdan, 2012; Mitchell, 2012).

El disturbio por viento puede tener distintos orígenes por fenómenos atmosféricos, como son: huracanes, tormentas de viento, tornados, ciclones, tormentas tropicales, anticiclones y frentes (Oliver y Larson, 1996; Inzunza, 2012). Por ejemplo, en el caso de los eventos de ventarrones originados por frentes tienden a generar vientos turbulentos y ráfagas donde se forman giros bruscos del viento, pudiendo ser breves pero violentos (Bidegain, 2010) ya que suelen ocurrir con zonas de baja presión (Servicio Meteorológico Nacional, s. f.).

Un frente o zona frontal es el límite que separa dos masas de aire con diferente temperatura y contenido de vapor de agua (Servicio Meteorológico Nacional, s. f.). En el caso de los frentes fríos, la masa de aire fría eleva la masa de aire cálida (Bidegain, 2010; Luna Niño, 2016) ya que la pendiente del aire frío es abrupta debido a que es más densa. Por esto, el aire cálido pierde calor y los cambios de temperatura modifican la estabilidad atmosférica volviéndola inestable. Si hay suficiente humedad en la atmósfera, la producción de nubes y precipitaciones es más probable (Luna Niño, 2016; Servicio Meteorológico Nacional, s. f.) y podría ser violenta, acompañándose de ráfagas de viento, vientos turbulentos, lluvias y tormentas (Bidegain, 2010). Cabe resaltar que fenómenos globales como El Niño (ENSO, por sus siglas en inglés) incrementan la frecuencia de los frentes fríos y lluvias durante los inviernos en México (Magaña *et al.* 1997). Sin embargo, su impacto y efectos no siempre son los mismos ya que están sujetos a la variabilidad atmosférica, especialmente de la temperatura y la humedad relativa.

Los efectos que tienen los ventarrones incluyen la reducción de la densidad de individuos arbóreos, inversión de distintos horizontes del suelo complejizando la microtopografía y cambios en las condiciones ambientales locales (Quine *et al.*, 1995; Dale *et al.*, 2001; Mitchell y Ruel, 2015). También pueden producir desigualdad de edades entre individuos de una población arbórea, e incluso reemplazar todos los organismos. Los ventarrones también generan cambios en el paisaje al modificar la matriz forestal, produciendo mosaicos complejos de áreas afectadas y no afectadas, donde los fragmentos perturbados suelen ser diferentes en forma, severidad y disposición (Lindemann y Baker, 2001 citado por Vaillancourt, 2008; Mitchell, 2012; Turner y Gardner, 2015).

Además, provocan interrupciones en el dosel promoviendo la creación de claros (Serrada, 2003) y brechas. Los claros tienen como límite la copa de los árboles que forman el bosque continuo adyacente (Runkle, 1981; Brokaw, 1982; Gómez-Pompa y Del Amo, 1985) y cuando son generados por ventarrones pueden ser dispersos y de distinto tamaño, o un mosaico de claros sobre el área en el que el disturbio tuvo impacto abarcando decenas de hectáreas (Runkle, 1985; Quine *et al.* 1995). Todas estas conformaciones espaciales de claros podrían afectar la estructura y diversidad del hábitat (Hobbs y Huenneke, 1992), provocar la muerte de los individuos que fueron resistentes al disturbio, o modificar la regeneración natural de la comunidad arbórea.

La formación de claros por la caída de ramas y árboles es fundamental en el proceso dinámico de la renovación del dosel (Martínez-Ramos, 1994). Son sumamente importantes en la dinámica de regeneración natural (Martínez-Ramos *et al.* 1988), ya que en ellos se presentan condiciones muy distintas a las que prevalecen bajo el dosel continuo del bosque. Las condiciones en los claros pueden variar porque hay mayor radiación solar, disponibilidad de nutrientes y humedad del suelo, así como variación en los rangos de temperatura (Oliver y Larson, 1996; Turner y Gardner, 2015). Estas características varían de acuerdo con el tamaño de los claros del dosel.

Ya que los ventarrones son fenómenos atmosféricos atípicamente fuertes, los cambios en su ocurrencia y frecuencia se han asociado al cambio climático (Mullan

*et al.*, 2011 citado por Moore y Watt, 2015). Por ello, el modelaje de sus efectos en poblaciones arbóreas se ha enfocado principalmente en generar proyecciones a escenarios vinculados al cambio climático (Peltola *et al.*, 1999; Gardiner *et al.*, 2000, 2008; Ancelin *et al.*, 2004). Por lo anterior, un primer paso para entender el efecto de los disturbios por viento en el bosque es empezar por describir el efecto de eventos individuales, con un registro confiable de superficies afectadas a partir de dicho evento. Dichas descripciones pueden ser realizadas después de un evento de ventarrones, evaluando la cobertura arbórea y la densidad de árboles en pie a través del paisaje (Mitchell, 2012).

Después de un evento de disturbio, la evaluación de daños puede orientar medidas de atención, en caso de ser requeridas (Schindler *et al.*, 2012). Contar con información reciente permite conocer los efectos de los disturbios (Manson *et al.*, 2009). Sin embargo, en la actualidad se cuenta con pocas descripciones del impacto de los ventarrones en la densidad de árboles en bosques de coníferas en los trópicos.

Para llevar a cabo la descripción de los sitios afectados por ventarrones, se pueden emplear imágenes generadas por percepción remota. Principalmente por medio de fotografías aéreas, ya que proveen ventajas de realizar análisis más rigurosos y replicables con técnicas ofrecidas por los Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Gagnon *et al.*, 1993, Gross, 1997 citado por Miller, 2000). Los SIG son sistemas que permiten procesar información y datos que cuenten con georreferenciación (coordenada geográfica) (Vázquez y Backhoff, 2017) y representan herramientas útiles en el manejo forestal (Ionut y Bogdan, 2012).

La percepción remota es la obtención de imágenes y datos mediante sensores instalados en plataformas que no están en contacto físico con el objeto de interés (Cámara Sánchez, 2005; Lira Chávez, 2011). La adquisición de imágenes a través de técnicas de percepción remota permite obtener las representaciones de propiedades de objetos espaciales, incluso en tiempo real (Cámara Sánchez, 2005; Claros Zelaya, Guevara Aguilar y Pacas Cruz, 2016).

Un método común de percepción remota es la fotografía aérea tradicional, que es adquirida a través de vuelos en avionetas o helicópteros, los cuáles deben adaptarse a la normatividad del país en el que se lleven a cabo (Claros Zelaya, Guevara Aguilar y Pacas Cruz, 2016) y a los recursos económicos con los que se cuenten para su utilización. Esto representa una desventaja cuando el levantamiento de información es requerido de manera inmediata y productos que tengan una resolución muy detallada, para generar datos a escala fina que se puedan trabajar a través de métodos fotogramétricos. La fotogrametría es una técnica indirecta en la que se emplean métodos y procedimientos que permiten trabajar la forma y dimensiones de un objeto por medio de fotografías (Anderson y Gaston, 2013; Claros Zelaya, Guevara Aguilar y Pacas Cruz, 2016).

El uso de percepción remota y de SIG permiten cuantificar espacial y temporalmente la estructura del dosel del bosque (Guerrero, 2016) por lo que la adquisición de información espacial con herramientas de percepción remota como los drones, debería permitir la obtención de datos apropiados de manera rápida, con buena resolución espacio-temporal (Tang y Shao, 2015) incluso en áreas de difícil acceso (Ruales Salazar, 2018).

Por ello, desde la década pasada los drones han sido utilizados con mayor frecuencia como herramienta para la obtención de información espacial. Estos son definidos como aeronaves reutilizables que no llevan operadores humanos, capaces de sostener un nivel o altura de vuelo controlada, que usan principios aerodinámicos y que pueden volar de manera autónoma o ser remotamente piloteados mediante control a distancia (Addati y Pérez, 2014; Tang y Shao, 2015; Remondino *et al.*, 2016; González-Jorge *et al.*, 2017; Vázquez y Backhoff, 2017). Dependiendo del principio de vuelo aerodinámico, los drones son clasificados como vehículos de ala fija o de ala rotatoria (Santos Clavero, 2014; Mumbone *et al.*, 2015; González-Jorge *et al.*, 2017).

Los drones también se conocen como: UAV (Unmanned Aircraft Vehicle), UAS (Unmanned Aerial System), RPA (Remotely Piloted Aircraft), RPAS (Remotly Piloted Aircraft System), VANT (Vehículos Aéreos No Tripulados), entre otros. Éstas

herramientas ofrecen ventajas por sus costos de material y costos operacionales, resolución/precisión espacial y temporal, ausencia de riesgo de personal, adaptabilidad, menor contaminación tanto auditiva como de CO<sub>2</sub>, son reutilizables y la velocidad en la adquisición de datos es alta (Santos Clavero, 2014; Tang y Shao, 2015; Banu *et al.*, 2016; Claros Zelaya, Guevara Aguilar y Pacas Cruz, 2016; Vázquez y Backhoff, 2017; Vargas-Ramírez, 2017). En México, el uso de drones está regulado por la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) y al no existir una normatividad específica para los drones, la DGAC extiende Circulares Obligatorias, que contienen la clasificación, especificación y requerimiento para la operación de estos.

Los drones representan una alternativa versátil a las técnicas de mapeo convencional (Mumbone *et al.*, 2015) ya que permiten estudiar fenómenos o variables ecológicas o ambientales, que muchas veces están obstaculizadas por no ser abordadas desde una escala apropiada (Anderson y Gaston, 2013). Además, la estabilidad de la toma de fotografías que ofrece un dron de ala rotatoria durante un vuelo lo hace una herramienta prometedora para la percepción remota (Banu *et al.*, 2016).

En materia forestal, se pueden realizar mapeos con drones de inventarios, así como de biodiversidad, silvicultura de precisión, gestión de recursos, estudios de patrones espaciales de procesos ecológicos, mapeo de claros, así como la medición de atributos del dosel (Banu *et al.*, 2016; Ruales Salazar, 2018), todo en diferentes niveles de integración (Galicia *et al.*, 2007). El mapeo de zonas afectadas por ventarrones a través de drones permite proveer de información espacial de manera rápida a los tomadores de decisiones, investigadores, o quien requiera adquisición rápida de datos (Anderson y Gaston, 2013). Lo anterior se puede realizar ya que se pueden generar nubes de puntos, ortomosaicos, curvas de nivel y modelos digitales de elevación (Vázquez y Backhoff, 2017) georreferenciados.

La información generada puede adquirir relevancia en lugares donde existan programas de manejo, como lo son las Áreas Naturales Protegidas (ANP), que son zonas del territorio nacional que no han sido alteradas significativamente por la

actividad humana o que requieren ser preservadas y restauradas (CONANP, 2016). Existen diferentes categorías de ANP, entre las cuales, las Reservas de la Biosfera destacan debido a su extensión territorial y complejidad ecosistémica (Brenner, 2006).

Una de las ANP más emblemáticas de México es la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM) en la cual habitan especies representativas y que además resalta por el fenómeno migratorio de la mariposa monarca (*Danaus plexippus L.*) (Gómez-Pompa y Dirzo, 1995). La presencia de la mariposa en la región y el conocimiento del fenómeno migratorio durante la segunda mitad del siglo pasado propició que el área fuera declarada zona de reserva. Debido al interés en la conservación de las áreas de hibernación, a través de distintos decretos, en el año 2000 el Área Natural Protegida fue asignada a la categoría de Reserva de la Biosfera con la configuración que conocemos en la actualidad (CONANP, 2001).

La RBMM experimenta disturbios naturales como son plagas, deslaves e incendios. En el caso de disturbios por ventarrones, no se encontraron registros de eventos categorizados como tal o cuyas descripciones se refieran textualmente a algún elemento de su régimen de disturbio. Solamente existen registro de daños por frentes fríos y tormentas invernales relacionados con heladas, congelamiento y muerte de mariposas monarca (ver Brower *et al.*, 2004; Brower *et al.*, 2017). En el programa de manejo de la RBMM no se indican acciones de respuesta correspondientes a este tipo de contingencias, ni medidas de prevención relacionadas.

Ya que cuantificar los efectos que tiene un ventarrón sobre la estructura del dosel puede proporcionar información para documentar la severidad del disturbio, el objetivo de este proyecto es documentar los niveles de daño en la estructura del dosel asociados a ventarrones que ocurrieron en la RBMM. Concretamente, se busca describir el estado de la estructura del dosel, su variación en cuanto a la cobertura resultante por ventarrones y su asociación con árboles vivos, muertos en pie y derribados, así como con la variación de la pendiente y orientación de la ladera de los sitios afectados.

## **Antecedentes**

Existen investigaciones de percepción remota enfocadas al dosel, aunque no hay evaluaciones de efectos de ventarrones. Debido al alto costo del uso de imágenes satelitales Koh y Wich (2012) capturaron datos de percepción remota a través de drones. En su estudio inspeccionaron y mapearon bosques tropicales, en el que reportaron que pudieron distinguir fácilmente diferentes usos del suelo. Concluyeron que utilizar drones podrían ahorrar de manera significativa tiempo, así como recursos humanos y financieros en actividades de monitoreo ambiental, verificación de información del terreno y clasificación de coberturas y uso del suelo a través de fotografías aéreas.

Wallace *et al.* (2012) utilizaron un octocóptero equipado con un sensor LiDAR (siglas para light detection and ranging) para mapear la estructura de la corona de los árboles. Concluyeron que es posible evaluar la estructura del dosel al nivel de árboles individuales, a través de la generación de nubes de puntos de alta resolución.

En la RBMM se evalúan los cambios en la cubierta vegetal y cambios de uso de suelo, estudios en los que herramientas de percepción remota son insustituibles. Un ejemplo de estos estudios es el del primer levantamiento con fotografías aéreas realizado en 1999 (López García, 2014) que sólo fue utilizado para el reconocimiento y visión general de la RBMM. Desde entonces, de 1999 al 2011 se realizaron vuelos para elaborar mosaicos. Los mosaicos en conjunto con imágenes satelitales han permitido evaluar el cambio en la densidad de la cubierta vegetal de la reserva (López García, 2014). El autor concluye que, a través de la comparación de imágenes se encontraron evidencias de deforestación y degradación forestal, con un cambio total de 2170 hectáreas en un periodo de 10 años para la zona núcleo de la reserva.

Otro estudio es el de Champo-Jiménez (2012), que evalúa la pérdida de cubierta forestal en la Reserva a través de imágenes satelitales SPOT. En 2017, el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF, por sus siglas en inglés) analizó el cambio en la

cobertura forestal en la zona núcleo de la reserva como parte del monitoreo forestal. Compararon fotografías aéreas de los años 2015 y 2016 trabajadas en ortomosaicos. Reportaron la degradación de 53.94 hectáreas por la caída de árboles por ventarrones, que fueron provocados por la tormenta del 9 al 11 de marzo del 2016.

López-Sánchez (2018) utilizó dos ortomosaicos producto de fotografías de vuelos con dos drones distintos. Los vuelos se hicieron sobre la misma área, pero con un año de diferencia, para evaluar los estragos de la tala ilegal dentro de la Propiedad Estatal de la RBMM. También comparó la calidad de las imágenes de los drones y la eficiencia de su procesamiento con distintos equipos de cómputo. Villaseñor Martínez (2019) analizó una experiencia de mapeo y monitoreo comunitario de recursos agroforestales con drones, así como su uso potencial para la defensa territorial indígena en la comunidad Indígena de Carpinteros en la RBMM.

No se encontraron estudios relacionados con la evaluación de los efectos de ventarrones en la estructura del dosel o su asociación con variables topográficas en la RBMM. Se encontraron registros de tormentas, como en la investigación de Calvert *et al.* (1983) que reportaron un periodo de diez días de tormentas en enero de 1981 que provocó descensos en la temperatura, caída de granizo y nieve, lluvia y vientos fuertes. Durante este periodo de tiempo, registraron la ruptura de copas de árboles y ramas de pino y oyamel, e incluso el desarraigo de un árbol. En el estudio de Brower *et al.* (2004) documentan una tormenta invernal que ocurrió del 12 al 14 de enero del 2002, y reportaron la caída de ramas de árboles de oyamel y aclareo del dosel como efecto del fenómeno meteorológico. Ambos eventos fueron estudiados debido al impacto que tuvo en la mortalidad de mariposas monarcas.

En el estudio de Ramírez *et al.* (2015) sobre amenazas a la disponibilidad de sitios de hibernación para la mariposa monarca, mencionan que en el 2010 fueron derribados árboles por fuertes vientos, cuyos troncos fueron removidos posteriormente. Finalmente, Brower *et al.* (2017) estudiaron la mortandad de mariposas como consecuencia de la tormenta de marzo del 2016, en el que describieron la tormenta.

## **Objetivo**

Evaluar los efectos de los ventarrones del 2016 en la estructura del dosel y la generación de claros en los bosques de coníferas de la Reserva Biosfera Mariposa Monarca.

### ***Objetivos particulares***

1. Generar y analizar imágenes de la estructura del dosel afectado por los ventarrones.
2. Documentar las superficies afectadas por diferentes daños al dosel.
3. Explorar las relaciones entre características del terreno y los daños a la estructura del dosel.

## **Materiales y métodos**

### ***Área de estudio***

La RBMM se localiza en los límites de los estados de México y Michoacán de Ocampo, entre los municipios de Donato Guerra, San Felipe del Progreso, Temascalcingo, y Villa Allende en el Estado de México y en de Angangueo, Aporo, Contepec, Ocampo, Senguio y Zitácuaro en el estado de Michoacán. La RBMM cuenta con una superficie de 56, 259 has, divididas en tres zonas núcleo y dos zonas de amortiguamiento (Diario Oficial de la Federación, 2000) (Figura 1).

El área se caracteriza por un relieve montañoso a partir de eventos volcánicos del Terciario, y pertenece a la provincia morfotectónica denominada como Sistema Volcánico Transmexicano, que está compuesto por sierras, lomeríos, valles intermontanos y llanuras, con un rango de altitud de 2400 a 3640 m.s.n.m. (CONANP, 2001).

La RBMM tiene suelos permeables medianamente desarrollados y presenta erosión de ligera a fuerte, en cuya topografía predominan las pendientes pronunciadas. Las pendientes varían de 0° a 66° y el 40% de la superficie de la reserva posee pendientes pronunciadas (>20°), mientras que el 40% de las laderas se orientan hacia el sureste, suroeste o sur, y el 60% se orienta al norte, noroeste o noroeste (Carlón-Allende *et al.*, 2015).

La zona de la reserva se originó por efusiones basálticas, por lo que predominan los suelos volcánicos. En laderas con pendientes intermedias, es decir, de 10° a 25°, el suelo es incipiente, de textura gruesa y profundidad variable, mientras que en pendientes mayores a 25° se presentan suelos someros poco profundos. La configuración del relieve confiere a la región una importante zona de captación pluvial y recarga acuífera (Gómez-Pompa y Dirzo, 1995).

En la región predomina un clima templado subhúmedo con lluvias en verano y lluvias escasas en invierno, que cambia en distancias cortas por su topografía, lo que produce variantes microclimáticas importantes (CONANP, 2001). La RBMM tiene una temperatura media anual de 22°C y una precipitación que oscila entre los 700 y los 1250 mm (García 1997 citado por Martínez-Torres *et al.*, 2016).

La vegetación corresponde a un bosque templado con predominio de gimnospermas. Los tipos de vegetación son de afinidad neártica con vegetación dominante de *Abies religiosa* (CONANP, 2001) en codominancia con *Quercus*, *Pinus* y de bosque de niebla, con presencia de plantas herbáceas, arbustos y notables porcentajes de endemismos en grupos como las epífitas y hemiparásitas (Cornejo-Tenorio e Ibarra-Manríquez, 2017).

### ***Descripción del evento de disturbio***

El 10 de marzo del 2016 la SAGARPA (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural) reportó que el frente frío número 46 se encontraba ocluido y en sinergia con la onceava tormenta invernal y el frente frío número 45. Los fenómenos

meteorológicos provocaron claros que en conjunto sumaron 53.94 hectáreas en el dosel de la RBMM (CONANP, 2016).

Brower y colaboradores (2017), describieron la tormenta a partir de datos obtenidos de una estación meteorológica ubicada al oeste de Sierra Chincua, en el Llano de las Papas y otra estación localizada a 1.4 km noroeste de la otra estación, en el Llano de los Villalobos. Señalan que la tormenta provocó bajas temperaturas con registros menores a los  $-4^{\circ}\text{C}$ , nubosidad extrema, lluvias del 9 al 11 de marzo con una acumulación total de 78 mm, nieve de 10 a 12 cm, 10 cm aguanieve y de 4-5 cm de granizo al norte de la RBMM. El viento alcanzó su velocidad máxima de 108km/h el 9 de marzo proveniente del oeste con dirección al suroeste, que coincidió con la parte más intensa de la tormenta y las temperaturas más bajas. La dirección del viento predominante antes y después de la tormenta fue este-noroeste. Durante el periodo de tiempo que duró la tormenta, la dirección del viento provenía del oeste y se dirigió hacia el este. La humedad relativa alcanzó registros del 99%.

### ***Diseño de muestreo***

El 13 de febrero del 2017 se realizó una visita preliminar a la RBMM con académicos de la Universidad Nacional Autónoma de México, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, representantes de asociaciones y grupos no gubernamentales, así como trabajadores de la reserva. Se visitaron sitios entre el Llano de las Papas y la Sierra Chincua en los que tenían interés de evaluar los daños por los ventarrones, así como las extensiones de los mismos.

A través de la página de la transparencia, se solicitaron a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), a la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) y a la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) las coordenadas de sitios con registro de árboles derribados por los ventarrones de marzo del 2016. Sin embargo, no proporcionaron la ubicación de los sitios.

Por lo anterior, los sitios sobrevolados durante el año 2017 fueron seleccionados por personal de la RBMM y dueños de los predios (Tabla 1). Los sitios fueron elegidos porque tenían registro de las afectaciones provocadas por la tormenta de marzo del 2016, así como por la necesidad de conocer el estado de los sitios. Adicionalmente, se solicitó información de manera directa al personal de la RBMM. El director de la RBMM compartió una relación de predios y coordenadas donde fueron registrados los efectos de los ventarrones. Los sitios no coincidían con sitios de hibernación y/o desplazamiento de las mariposas. Con base en las coordenadas compartidas, se realizaron los vuelos del 2019 (Tabla 1 y Tabla 2). Se realizaron consultas con informantes clave sobre el manejo de la contingencia.

Durante los vuelos se respetaron las condiciones que establece la Circular Obligatoria CO AV-23/10 R4 expedida el 25 de julio del 2017. Sin embargo, el 19 de julio del 2019 se emitió la Circular Obligatoria CO AV-58/19. Esta circular contiene las Reglas Generales para la operación de drones de estado y civiles en casos de emergencia y/o desastres causados por fenómenos naturales y/o antrópicos.

### ***Procesamiento de imágenes y capas de información***

Las fotos tomadas durante los vuelos fueron utilizadas como insumos para generar ortomosaicos con el programa Agisoft PhotoScan Pro 1. 2. 5. El proceso para obtener los ortomosaicos requirió la depuración manual de las fotografías que generaban problemas de procesamiento al programa. Las imágenes borrosas, mal tomadas o con elementos que no correspondían al paisaje que generaban problemas al programa fueron excluidas del proceso.

Después de depurar las imágenes, se orientaron y alinearon en el programa para generar una nube de puntos dispersa. Se eliminaron aquellos puntos de la nube que se encontraban muy alejados, para evitar la deformación del modelo. Posteriormente, se generó una nube de puntos densa, con la cual se construyó una malla, luego la textura y un modelo tridimensional. Con los últimos elementos

generados, se creó un Modelo Digital de Terreno (MDT). El MDT fue utilizado para generar un ortomosaico. Este proceso se repitió para la construcción de un ortomosaico por cada sitio y fueron exportados en formato .TIFF.

### ***Interpretación de imágenes para categorías de cobertura***

Los ortomosaicos se trabajaron en ArcGIS 10.3. Para realizar la fotointerpretación se construyó una malla con cuadros de 20x20 m sobre cada ortomosaico. Se eliminaron aquellos cuadros que quedaban fuera del área de interpretación, así como aquellos que estaban en los bordes de los ortomosaicos donde la imagen no es clara. La malla se alineó con un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) a 20 m, que fue generado a partir de curvas de nivel con valores de altura a cada 20 metros. Los cuadros de la malla sirvieron como unidades discretas sobre las cuales se realizó una interpretación sistemática de los ortomosaicos.

En cada cuadro de la malla se asignó una categoría de cobertura del dosel, que indica un rango de porcentaje de cobertura basados en los rangos utilizados en el estudio de Honey-Rosés *et al.* (2018). La categoría 0 indica 0%, 1 corresponde del 1–10%, 2 corresponde del 11–40%, 3 indica de 41–70% y finalmente 4, que indica cobertura del 71–100%. Para ello se elaboró una plantilla (Tabla 5) con cada categoría de cobertura que sirvió de apoyo durante la interpretación, sobre todo para aquellas parcelas cuya cobertura era confusa. Para recuadros en los que no se podía determinar la cobertura por deformaciones propias del ortomosaico, se les asignó un valor de 7, que también es referido como área “Sin interpretar”. Estos espacios corresponden principalmente a los bordes del área interpretada.

Concluida la interpretación de cada ortomosaico, en cada uno de ellos se obtuvo una submuestra de 25 cuadros por categoría de cobertura al azar. En los casos en los que no fue posible obtener 25 recuadros por categoría de cobertura, se contabilizó en el total de los cuadros que hubiera para dicha categoría. Esa segunda toma de datos consistió en contabilizar la cantidad total de: árboles vivos, árboles muertos en pie y árboles derribados.

Adicionalmente, para cada ortomosaico se construyeron dos capas de información a partir del MDE. Una capa correspondía a la orientación de laderas y otra a la pendiente del terreno. La primera se reclasificó en cuatro orientaciones: norte, este, sur y oeste. La otra capa se dividió en cuatro rangos debido a que la pendiente variaba entre  $0.01^\circ$  y  $48.93^\circ$  (Tabla 2). Posteriormente, se extrajeron los valores de pendiente y orientación de la ladera para cada submuestra. Como producto de ésta interpretación, se obtuvo una  $N=611$  y la siguiente información para cada cuadro de cada submuestra: 1) categoría de cobertura, 2) categoría de orientación de ladera, 3) categoría de pendiente, 4) cantidad de árboles vivos, 5) cantidad de árboles muertos en pie y 6) cantidad de árboles derribados.

### ***Análisis estadísticos para describir la estructura del dosel en los sitios seleccionados***

Se calcularon medidas de tendencia central (promedio) y medidas de dispersión (varianza, desviación estándar y error estándar) para la cantidad de árboles vivos, árboles muertos en pie y árboles derribados en la submuestra de cuadros. Los resultados fueron extrapolados a hectáreas, para facilitar su interpretación.

Se realizaron análisis de varianza (ANOVA) de una vía para evaluar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre las categorías de porcentaje de cobertura del dosel y componentes arbóreos, que son los árboles vivos, árboles muertos en pie, así como del material o troncos derribados. Cada categoría de cobertura fue la variable dependiente mientras que las variables independientes fueron las correspondientes a la estructura forestal.

### ***Análisis estadísticos para explorar la influencia de la topografía en la estructura del dosel post-ventarrones***

Para probar si las variables de componentes arbóreos se asocian de forma dependiente con las variables de pendiente del terreno y de orientación de la ladera,

se realizó una regresión logística ordinal. Esta prueba se eligió porque se querían evaluar simultáneamente el efecto de las variables independientes en una variable dependiente ordinal. Las variables dependientes fueron las categorías de cobertura con 5 niveles. Las variables independientes fueron la orientación de la ladera, variable categórica con 4 niveles (norte, este, sur y oeste) y la pendiente, una variable continua, fue dividida en 4 rangos (0.01–10.56, 0.56–18.62, 18.62–27.06 y 27.06–48.93). Se estableció la orientación de ladera oeste como punto de comparación.

Ya obtenidos los resultados, se comparó con el modelo nulo a través de valores del criterio de información de *Akaike* y se calculó la *chi* cuadrada ( $\chi^2$ ). Posteriormente, se probó el supuesto de proporcionalidad de los odd ratios, utilizando una función de verosimilitud. Finalmente, se hizo una prueba de ANOVA tipo III, para evaluar la relación entre orientación y pendiente.

## **Resultados**

### ***Densidad del dosel por sitios y por cobertura***

El porcentaje de superficie por categoría de cobertura entre los sitios fue muy variado (ver Tabla 3 y las Figuras 8, 10, 12, 14, 16 y 18). En Sierra Chincua, el Llano de las Papas, el Llano de los Conejos y el Ejido San Jerónimo Pilitas, las categorías de cobertura del dosel entre 11 – 40% y 41 – 70% de cobertura fueron las que cubrieron mayor superficie. En el ejido Casa Blanca más de la mitad del área interpretada no tuvo cobertura arbórea, siendo, además, la categoría de cobertura 4 la más baja con 0.92 ha (3.7% en la Tabla 3). La ocurrencia de ventarrones en los sitios evaluados no generó la desaparición total del dosel, pero sí una disminución considerable en la densidad de árboles.

### ***Medidas de tendencia central, medidas de dispersión y análisis de varianza de una vía por componentes arbóreas de la estructura del dosel***

Los sitios presentan el mismo patrón de distribución de densidad de árboles vivos, con excepción del Ejido San Jerónimo Pilitas. Debido al criterio de categorización, los sitios no tuvieron registros de individuos vivos en la categoría de cobertura 0. También como resultado del criterio de categorización, la categoría de cobertura 4 es la que presentó la mayor cantidad de árboles, con excepción del área sobrevolada en el ejido San Jerónimo Pilitas, donde la variación no fue representativa entre las categorías de cobertura 3 y 4. Para el área sobrevolada en el Ejido Chincua, no se encontraron espacios que pudieran categorizarse con cobertura de dosel entre 1 y 10% (Figura 2).

Solamente en la categoría de cobertura 4 se encontró que la diferencia fue significativa entre los sitios sobrevolados ( $F = 11.46$  y  $p < 0.01$ ), ya que para el rango de cobertura del 71 al 100% se presentaron diferencias en la cantidad de árboles vivos para cada ortomosaico. El resto de las categorías no presentaron diferencias significativas entre los grupos y la cobertura.

Hubo diferencias significativas entre todos los ortomosaicos para la variable de árboles muertos en pie. En el área del Llano de los Conejos no se identificaron árboles muertos en pie (Figura 3). En la categoría 0, donde se omitieron los Ejidos Chincua y San Jerónimo Pilitas, por tener un solo registro de 0, se obtuvieron los valores de  $F = 4.2$  y  $p < 0.01$ . En los casos de Sierra Chincua y el Llano de las Papas, las densidades son similares ya que la categoría de cobertura 1 ( $F = 4.72$  y  $p < 0.01$ ) se observó mayor presencia de árboles muertos en pie, siendo el Llano de las Papas el sitio con árboles derribados más heterogéneo, sin relación aparente con la categoría de cobertura. Para la categoría 2 se obtuvieron los valores de  $F = 4.06$  y  $p < 0.01$ , para la categoría 3 se obtuvieron los valores de  $F = 4.67$  y  $p < 0.01$  y para la categoría 4 se obtuvieron los valores de  $F = 7.02$  y  $p < 0.01$ .

De todas las categorías, el sitio que en cantidades tuvo más árboles muertos en pie fue Sierra Chincua. Cabe resaltar que para los ejidos Chincua y San Jerónimo Pilitas, no se encontraron árboles muertos en pie cuando no se tenía cobertura, ni

para el ejido Chincua cuando la cobertura iba de 1 a 10% (Figura 3). Gómez García, M. (comunicación personal, 24 de enero del 2019) mencionó que quedaron muchos árboles derribados y quebrados, que posteriormente fueron extraídos del ejido Chincua. El área donde hubo mayor variación en registros fue en la categoría de cobertura 0.

La cantidad de árboles derribados varió para todos los sitios sobrevolados. En la categoría 0 se omitieron los valores del Ejido Chincua y del Ejido San Jerónimo Pilitas –por ser muy pocos– se obtuvieron los valores de  $F = 27.23$  y  $p < 0.01$ . En el Ejido Chincua se encontró muy poco material derribado y en la categoría 1 ( $F = 6.83$  y  $p < 0.01$ ) se omitió en el ANOVA ya que no se obtuvieron valores para ese sitio.

Para la categoría 2 se obtuvieron los valores de  $F = 19.60$  y  $p < 0.01$ , para la categoría 3 se obtuvieron los valores de  $F = 4.72$  y  $p < 0.01$  y para la categoría 4 se obtuvieron los valores de  $F = 1.78$  y  $p = 0.121$ . De acuerdo con los valores de  $p$  obtenidos, las categorías de cobertura, con excepción de la categoría 4, presentaron diferencias significativas en la variable de árboles derribados (Figura 4).

En Sierra Chincua se presentó una distribución de la presencia de árboles derribados inversa al histograma de densidad de árboles vivos y fue el sitio donde se encontraron más árboles derribados en la fotointerpretación. El Llano de las Papas fue el segundo lugar con la mayor densidad de árboles derribados, con un patrón de acumulación en las categorías de cobertura distinto a los demás sitios. Para los sitios de el Llano de los Conejos y del Ejido San Jerónimo Pilitas, no se encontraron árboles derribados (Figura 4).

### ***Influencia de la topografía en la caída de árboles por viento***

En pendientes elevadas hay pocos espacios sin vegetación arbórea, mientras que en pendientes planas hay más registros de áreas sin cobertura. Para los rangos de pendiente intermedias que van de  $10.56$  a  $18.62^\circ$  y de  $18.62$  a  $27.06^\circ$ , la cobertura 0 no presenta diferencias significativas entre esos rangos de pendiente (Figura 5).

Cuando la cobertura del dosel está en el rango de 1 al 10%, se ve favorecida en pendientes intermedias y su distribución es menor en pendientes altas.

La categoría de cobertura 2, es decir, del 11 al 40%, es más frecuente en pendientes planas y se ve favorecida en pendientes leves, siendo menos frecuente en pendientes elevadas. Para la categoría intermedia, es decir, del 41 al 70%, el segundo rango de pendiente es donde más observaciones se registraron. Entre el primer y tercer rango de pendientes no parece haber diferencias y el rango de pendiente más elevado es el que menos le favorece.

Para la categoría de cobertura más cerrada del dosel, que fue considerada mayor o igual al 71%, el tercer rango de pendiente es donde se registró mayor presencia de este rango de cobertura. Sin embargo, es claro que los rangos de pendiente intermedios son los que más favorecen su presencia, siendo el rango de pendiente más plano en donde menor registros tuvo.

En general, predominan los registros en pendientes orientadas al sur y al oeste. Todas las coberturas coincidieron con la menor cantidad de registros en la ladera orientada hacia el norte. En áreas donde no se detectó cobertura arbórea, la mayoría de los registros estuvieron en la orientación sur. La categoría de cobertura del dosel más cerrada fue detectada en mayor medida en la orientación sur, seguida de la orientación oeste por muy poca diferencia.

La regresión logística ordinal fue empleada para evaluar el efecto de la pendiente y las categorías de orientación de la ladera (norte, este, sur y oeste) en el porcentaje de cobertura del dosel en los sitios afectados por ventarrones. A partir de una prueba de independencia, se obtuvo la  $\chi^2$ , que arrojó valores significativos. Los valores obtenidos fueron: 0.00739 para la orientación, 0.00052 para la pendiente y 0.0197 para la relación entre orientación y pendiente. Sin embargo, de acuerdo con el valor de la  $R^2$  Nagelkerke, el modelo solamente explica el 5.3% de variación. Los predictores con mayor significancia del modelo fueron la orientación norte, la pendiente y la interacción entre esas dos variables, es decir, entre la orientación norte y la pendiente.

Los valores de *odds ratios* (OR) obtenidos se presentan en la tabla 4. Esos valores al ser utilizados como factores, producirían el aumento de una unidad en los predictores, si el resto de variables se mantienen constantes. Esto incrementaría las probabilidades de que las categorías de cobertura aumentaran con un intervalo de confianza del 95%. La orientación norte (OR 0.35 (IC 95% 0.19-0.64);  $p < 0.01$ ), la pendiente (OR 1.04 (IC 95% 1.02-1.06);  $p < 0.01$ ) y la relación de orientación norte con pendiente (OR 1.06 (IC 95% 1.01-1.10);  $p < 0.01$ ) fueron las variables que se asociaron de manera independiente con las coberturas. Empleando un criterio estadístico de significancia de  $\alpha = 0.05$ , los efectos fueron significativos.

De acuerdo con lo anterior, para los cuadros de orientación norte en el aumento de una unidad, la probabilidad de tener mayor cobertura del dosel es 65% menor que en cuadros con orientación oeste, si el resto de variables se mantienen constantes. Esto con un factor de 0.35 con un intervalo de confianza del 95%. En el caso de la pendiente, el aumento de una unidad incrementaría las probabilidades en un 4% de tener mayor cobertura de dosel. Es decir, aumentarán en un factor de 1.04 con un intervalo de confianza del 95% si el resto de variables se mantienen constantes.

Finalmente, al combinar los efectos de orientación y pendiente, el aumento de una unidad de la pendiente en cuadros con orientación norte, incrementaría las probabilidades de tener más cobertura de dosel en comparación con los cuadros con orientación oeste en un 6% si el resto de variables se mantienen constantes. Aumentarán en un factor de 1.06 con un intervalo de confianza del 95%.

## **Discusión**

Los resultados de este estudio muestran que el porcentaje de área de cada categoría de cobertura muestran una gran variación entre los diferentes sitios sobrevolados. Como resultados de las ANOVAs, para la variable de árboles vivos solo la categoría de cobertura 4 presentó diferencias significativas entre los sitios sobrevolados. Para la presencia de árboles muertos en pie, no se encontró un patrón general ya que hubo diferencias significativas entre todos los sitios, siendo

la categoría de cobertura 4 la más significativa. Para la variable de árboles derribados, con excepción de la categoría de cobertura 4, las categorías de cobertura presentaron diferencias significativas con la variable de árboles derribados.

Como se presentó en la tabla 3, la proporción de cuadros de cada una de las categorías de cobertura varía entre los sitios analizados. En la mayoría de los sitios predomina el rango de cobertura de 40 a 70%, seguido por el rango de 10 a 40%. Incluso las categorías de cobertura más comunes varían entre los sitios. Es importante resaltar estas diferencias, ya que la mayoría de los fragmentos que conforman los mosaicos espaciales en los ecosistemas son por sí mismos heterogéneos (Pickett et al., 1999; Turner y Gardner, 2015).

La heterogeneidad resultante de la formación de claros por la caída de ramas y árboles diversifica los atributos a través del paisaje, por lo que la apertura del dosel es un componente importante en la renovación del mismo (Martínez Ramos, 1994; Ulanova, 2000). Las modificaciones producidas por disturbios como los ventarrones, promueven la dinámica de fragmentos al cambiar la densidad de árboles y las condiciones ambientales locales, como son la humedad del suelo, la intensidad lumínica que llega al sotobosque, etcétera. El reemplazo o recambio de árboles se refiere a la regeneración natural (Martínez Ramos, 1994). La muerte de árboles, en pie o derribados, influye en la regeneración natural al modificar el espacio, lo que podría incidir negativamente en la disponibilidad de semillas por la temporada en la que se presente o por la muerte de árboles semilleros.

La estructura multiescalar que produce esta heterogeneidad son los gradientes espaciales en el paisaje (Wu, 2006). Los gradientes espaciales que producen los ventarrones varían en intensidad y efectos, que son discretos y difusos dependiendo de la escala (Pickett *et al.*, 1999). Por ello, enfocarse en el análisis de un fragmento o claro en particular, podría llevar a conclusiones equívocas sobre el rol del claro en el paisaje (Pickett et al., 1999). Lo anterior resalta la importancia de hacer levantamientos de información en más de un sitio, como fue en este estudio, que el

objetivo radicaba en conocer la severidad y extensión de los efectos de un disturbio por viento al nivel del paisaje.

La estructura del dosel, es decir, su cobertura y componentes arbóreos afectados por la tormenta de marzo del 2016, variaron en conformación a través del paisaje de la RBMM. No obstante, se presenta el mismo patrón ascendente de distribución de densidad del dosel entre categorías de cobertura en todos los sitios, con excepción del Ejido San Jerónimo Pilitas. Excluyendo el área sobrevolada en dicho ejido, la categoría de cobertura 4 es la que presenta la mayor cantidad de árboles. Es preciso señalar que ese patrón era de esperarse, como resultado de los criterios establecidos para la categorización del porcentaje de cobertura.

El criterio de categorización establecido también explica por qué para la variable de árboles vivos, solamente en la categoría de cobertura 4 se encontró que la diferencia fue significativa entre los sitios sobrevolados. Es interesante resaltar que, en promedio, la densidad del arbolado fue diferente para cada sitio para esta categoría de cobertura. La distribución espacial de las coberturas no estuvo concentrada en alguna zona particular de los diferentes ortomosaicos, siendo distinta para todos los sitios. A pesar de que se esperaba que la cantidad de árboles vivos incrementara de la categoría de cobertura 0 a la 4, hay diferencias muy particulares, como en el Ejido San Jerónimo Pilitas.

Los promedios de densidad del arbolado vivo (individuos por hectárea) por sitio para la categoría de cobertura 4 fue de 250 para Sierra Chincua, 232.9 para Casa Blanca, 309.6 para el Llano de los Conejos, 295 para el Llano de las Papas, 268 para el Ejido Chincua y de 163 para el Ejido San Jerónimo Pilitas. De acuerdo con el Programa de Manejo de la RBMM (CONANP, 2001) “cuando la densidad de árboles disminuye a menos de 400 árboles por hectárea, se supera el umbral crítico para la sobrevivencia de las colonias” ya que en las condiciones microclimáticas disminuye la temperatura, incrementando su vulnerabilidad a la congelación. Aunque los sitios evaluados no son de hibernación para la mariposa monarca, con excepción del sitio en el Ejido San Jerónimo Pilitas, todos se encuentran en la zona núcleo de la RBMM

y en todos los sitios los valores promedio se mantuvieron muy por debajo de los 400 árboles por hectárea.

Sin embargo, durante la interpretación sólo se contabilizaron los árboles que abarcaban el dosel, es decir, sus copas. La utilización de este método de conteo no arroja el valor real de la densidad de árboles en la comunidad, ya que no se registraron los individuos jóvenes, como los concernientes a la regeneración natural. Aunque la densidad de árboles por categoría de cobertura es similar entre los sitios, puede que las cifras difieran por las tallas de la copa de los árboles o por su edad. Lo anterior, considerando que no se realizaron verificaciones en campo, como cálculos del diámetro a la altura del pecho (DAP) ni la distribución de tallas de los árboles.

En el caso de la variable de árboles muertos en pie no se encontró un patrón general, ya que hubo diferencias significativas entre todos los sitios sobrevolados. Es probable que los árboles muertos registrados en la fotointerpretación hayan muerto por la fractura que les provocó el ventarrón, aunque también pudieron morir por otras causas. De acuerdo con Paniagua (2013) un indicador de la integridad ecológica es el grado de conservación, que puede evaluarse a través de la densidad de la vegetación. Es por esto que la variable de árboles, muertos en pie y vivos, pueden utilizarse como atributo del paisaje o como indicador de la integridad del dosel.

En el caso de la variable de árboles derribados, los resultados obtenidos presentaron un patrón inverso en comparación con la variable de árboles vivos, es decir, en sitios con menor porcentaje de cobertura se encontró una mayor cantidad de árboles derribados, disminuyendo en sitios con porcentaje de cobertura mayores. Con excepción de la categoría de cobertura 4, los análisis de varianza de una sola vía mostraron que existen diferencias significativas entre los grupos. En el Llano de los Conejos y en el Ejido San Jerónimo Pilitas no se encontraron árboles derribados. En la RBMM derivado de una asamblea de ejidatarios y personal de la RBMM, se decidió sacar el arbolado dañado para evitar problemas posteriores, como plagas o incendios (Figueroa Reyes, J., comunicación personal, 22 de febrero del 2019 y

Gómez García, M., comunicación personal, 24 de enero del 2019). Por ello, la diferencia de árboles derribados entre los sitios es atribuible a la gestión posterior al incidente, es decir, a la remoción del material y a la accesibilidad de los sitios.

Brower y colaboradores (2017) reportan que el gobierno federal autorizó una tala de sanidad para los árboles dañados y la extracción de árboles derribados del 1 de abril al 31 de octubre del 2016, aunque se extendió el periodo de colecta. Sánchez Posadas, E. (comunicación personal, 13 de junio del 2019) señaló que se extrajo alrededor del 90% del material afectado por la tormenta, dejando restos no comerciales como puntas y ramas. También señaló que el material que se dejó, no fue extraído por las condiciones del terreno o porque no podía ser aprovechado de manera comercial y fue acomodado. Este material pudo observarse durante la fotointerpretación, ya que había zonas en las que se encontraba apilado. Sin embargo, con los resultados obtenidos en este estudio, no es posible calcular el volumen de material derribado, ni el volumen del material leñoso extraído, que de acuerdo con la cifra reportada por el WWF (2017), en el año 2016 se degradaron 53.94 hectáreas como consecuencia del evento de ventarrones en la RBMM.

Los resultados obtenidos de la fotointerpretación y los análisis de varianza demuestran que las condiciones de la estructura del dosel post-ventarrón se diferenciaron de manera significativa entre los sitios. Esta variación podría relacionarse con las acciones de manejo para atender la contingencia ambiental después de la tormenta, que fueron heterogéneas dentro de la reserva. También podría vincularse con las condiciones de la estructura que pudo tener el bosque antes del evento de ventarrones.

Debido a la alta variabilidad espacio-temporal de los disturbios es fundamental generar conocimiento de las diferentes propiedades que conforman los regímenes de disturbio (Schindler *et al.*, 2012; González *et al.*, 2014). Conocer sus características, como la severidad y la extensión, puede orientar la creación de planes o programas integrales de manejo que contemplen la respuesta de los disturbios ante los cambios que predicen los escenarios bajo el cambio climático y así reducir la vulnerabilidad de los ecosistemas (Dale, 2001; IPCC, 2012; Turner y

Gardner, 2015; Seidl *et al.*, 2017). En el caso de los ventarrones, Seidl *et al.* (2017) señalan que condiciones climáticas más cálidas y húmedas como consecuencia del cambio climático, podrían incrementar la frecuencia de los disturbios por viento.

Ya que los disturbios por ventarrones son fenómenos muy importantes para la estructuración del mosaico heterogéneo del bosque, el programa de manejo de la RBMM debería tener un componente dedicado exclusivamente a ellos. Este componente debería contemplar actividades de manejo previo a los disturbios, el manejo de sus efectos, la recuperación del sistema de los efectos, así como el manejo adaptativo (Dale, 2001). Durante el manejo de los efectos, cuando los impactos del disturbio ya fueron valorados, las acciones deben ser orientadas a reducir el impacto y la vulnerabilidad del ecosistema a la ocurrencia de ventarrones (Dale, 2001; Schindler *et al.*, 2012). Collin *et al.* (2006b) recomiendan que antes de establecer las estrategias de gestión es necesario tener una estimación de la extensión de los daños, lo que orientará las acciones a realizar.

Es esencial que durante el manejo post-ventarrones se concilien los intereses divergentes de diferentes actores, que se tengan planes eficientes de comunicación interna y externa y que se incentive su participación a través de mecanismos apropiados para la atención del disturbio (Brenner, 2006; Collin *et al.*, 2006a; Riguelle *et al.*, 2011). Para orientarse en la toma de decisiones, los actores requieren información del riesgo de daños por ventarrones, incluyendo la información relacionada a variaciones regionales (Moore *et al.*, 2013). Gardiner y Stacey (1996) sugieren mejorar la estabilidad de la comunidad arbórea para reducir el riesgo de daños por ventarrones, al incrementar la densidad de árboles y arbustos en las orillas del bosque. Otra medida que sugieren Riguelle *et al.* (2011) es realizar evaluaciones periódicas después del disturbio.

Como parte del manejo posterior al disturbio también se deben considerar las posibles interacciones de los efectos de los ventarrones con agentes o efectos de otros disturbios. Estas interacciones pueden incrementar las probabilidades de que se presenten sinergias con otros disturbios, al generar ambientes propensos a epidemias de escarabajos descortezadores o combustibles para incendios (Seidl *et*

*al.*, 2017). En el Programa de Manejo de la RBMM (CONANP, 2001) no se tiene ninguna medida de acción para la atención o gestión relacionada con disturbios por viento. En el apartado 5.2 “Componente manejo de recursos naturales para el desarrollo sustentable” trata la fragmentación de parcelas forestales como problema, pero no hace referencia a disturbios por viento. En el apartado 5.2.4. “Subcomponente manejo y aprovechamiento de los bosques de Oyamel” se refiere a la pérdida de hábitat de la mariposa monarca como una problemática central y lo aborda desde el cambio de uso de suelo, sin embargo, tampoco se mencionan disturbios. En el componente de monitoreo e investigación científica, en el apartado 5.4.5 “Subcomponente estudios ecológicos básicos del bosque de Oyamel” se hace mención de los incendios forestales como problemática en la conservación del bosque de oyamel, y nuevamente no se hace mención sobre otros disturbios, ni la posible sinergia entre ellos.

Las características de la estructura del dosel tienen un efecto importante en la resistencia del bosque contra el daño por ventarrones, por lo que es importante reconocer que la densidad arbórea y, por lo tanto, la cobertura del dosel, son influenciados por el manejo (Ionut y Bogdan, 2012). Sin embargo, en la gestión post-disturbio no sólo debe considerarse la integridad de árboles a nivel local y de paisaje y la comunidad arbórea, sino también otros atributos del paisaje como es la topografía (Waldron *et al.*, 2013). Las características topográficas de un sitio influyen en la variación de los efectos de los ventarrones a través del territorio, por lo que los resultados son heterogéneos (Quine, 1995; Waldron, 2013; González *et al.*, 2014).

En relación con la topografía, como parte de los resultados de este proyecto se encontró que en las pendientes ligeras tuvieron, en general, más registros de coberturas de dosel abiertas. En comparación, en las pendientes elevadas tuvieron coberturas de dosel más cerradas. En cuanto a la orientación de ladera, predominaron los registros en pendientes orientadas al sur, seguida por las orientadas hacia el oeste. La cantidad de registros en la orientación este fue muy similar para todas las categorías de cobertura. La menor cantidad de cuadros estuvieron orientados hacia la ladera norte, para todas las categorías de coberturas.

De acuerdo con el estudio de Carlón-Allende y colaboradores (2015) en la RBMM la orientación de laderas sureste, suroeste y sur abarcan el 40% de la superficie, mientras que el resto está orientado al norte, noreste y noroeste. El programa de manejo de la RBMM indica que el 41.75% de los escurrimientos principales se orientan hacia el norte y el 58.25% al sur de su superficie (CONANP, 2001). De los sitios sobrevolados en este proyecto, el 21.58% de las laderas corresponde al norte, noreste y noroeste, mientras que el 53.01% corresponde al sureste, suroeste y sur. El 10.14% de las laderas estuvieron orientadas hacia el este y el 15.22% al oeste. La proporción de orientación de las laderas encontrada fue distinta que la señalada por Carlón-Allende *et al.* (2017). La diferencia podría deberse al tipo de muestreo utilizado en este estudio, que no fue aleatorio sino sistemático, debido a la heterogeneidad de los efectos del ventarrón sobre el paisaje de la RBMM. Además, las escalas espaciales de estudio en ambas investigaciones son distintas, por lo que modificando la escala de observación podrían obtenerse resultados más similares.

Gómez-Pompa, A. y Dirzo, R. (1995) reportan que las pendientes predominantes en la reserva van de 10 a 25°. De acuerdo con los rangos de pendiente de los sitios evaluados en este estudio, el 22.91% corresponde al rango de 0.01–10.56° de inclinación, el 34.86% al rango de 10.56–18.62°, el 23.4% al rango de 18.62–27.06°, mientras que el 18.82% al rango de 27.06–48.93°. Tanto en esta investigación como en el estudio que Carlón-Allende y colaboradores (2015) realizaron en la RBMM, se encontró que existe una relación directa entre pendientes elevadas y zonas con bosque mejor conservados. Además, los resultados de este estudio indicaron que la cobertura del dosel que resulta del ventarrón tiene una relación negativa con la orientación norte, y positiva con la orientación sur, este y oeste, así como con la interacción entre orientación norte y pendiente. Es decir, que el porcentaje de cobertura del dosel depende en gran medida de la orientación y la pendiente.

El valor de la  $R^2$  de Nagelkerke de la relación de la topografía con la densidad de cobertura sugieren que tanto la orientación como la inclinación de la pendiente, no explican de manera sustancial la variación de la cobertura del dosel luego de un disturbio por ventarrones. Las condiciones físicas del suelo como la profundidad, el

tipo y la saturación hídrica, son factores que podrían haber influido en la relación de la respuesta del rodal ante los efectos de los ventarrones (Gardiner y Stacey, 1996; Ionut y Bogdan, 2012; Mitchell, 2012; Moore *et al.*, 2012 y Mitchell y Ruel, 2015), condiciones que no fueron analizadas en esta investigación.

Las condiciones físicas del suelo suelen estar fuertemente influenciadas por la orientación de la ladera, ya que la exposición de las laderas actúa como modificador de condiciones microclimáticas debido a la insolación que reciben (Mazzola *et al.*, 2008, Luis-Martínez *et al.*, 2020, y Auslander *et al.*, 2003). Estas variaciones modifican los atributos del suelo que, a su vez, afectan a la comunidad arbórea en su composición y estructura (Mazzola *et al.*, 2008). En el hemisferio norte, laderas con orientación norte reciben mayor radiación solar (Auslander *et al.*, 2003). Esto pudo influir en el nivel de significancia que tuvo esta orientación, en la que podrían variar sus atributos en comparación con las otras orientaciones (sur, este y oeste) (Tabla 4).

Los sitios sobrevolados estaban repartidos en la zona norte de la reserva. Realizar muestreos sistemáticos permitieron evaluar la afectación por los ventarrones, que no fue homogénea dentro del polígono de la reserva. El uso de herramientas de percepción remota permitió obtener información de la localización de fragmentos de vegetación y diferentes propiedades del paisaje, en escalas apropiadas al fenómeno ecológico estudiado, como la configuración de rodales (Galicia *et al.*, 2007; Anderson y Gaston, 2013; Guo *et al.*, 2018).

Los bordes de los ortomosaicos tuvieron deformaciones importantes, ya que el empalme requerido para sitios con vegetación densa no fue suficiente, por lo que se desaprovechó una parte importante del área sobrevolada. Claros, Guevara y Pacas (2016) recomiendan incrementar la altura de vuelo para áreas con vegetación y que la superposición de imágenes sea de 85% frontal y 70% lateral, además de adaptar el diseño de vuelo a las pendientes. Sin embargo, debido a la falta de información previa al levantamiento de información, no se pudieron programar los vuelos de manera automática, ni seleccionar espacios para colocar puntos de

control que permitieran rectificar geoespacialmente los ortomosaicos y generar ortofotos.

Por ello, debido a la escasez de información y estudios relacionados con diferentes tipos de disturbios en bosques montanos en México (Manson *et al.*, 2009; Calderón-Aguilera *et al.*, 2012) se deben promover este tipo de estudios para comprender mejor la respuesta de los ecosistemas ante dichos disturbios. Es necesario complementar esta información, ya que nos proveerá de herramientas necesarias para mejorar el manejo de los bosques ante condiciones del cambio climático, considerando cómo responden los bosques ante múltiples eventos de disturbios (Dale, 2001).

## **Conclusiones**

Los efectos de ventarrones en el dosel de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca provocan cambios en su estructura por medio de modificaciones en la comunidad arbórea. Este tipo de disturbio provoca el derribo, fractura y muerte de árboles de manera heterogénea, generando mosaicos a través del paisaje. Los efectos se destacan por diferentes gradientes de intensidad, lo que incrementa la complejidad del ecosistema.

La variación de la estructura del dosel posterior a un ventarrón se manifiesta de manera importante en la cobertura del dosel. El porcentaje de cobertura también se explica por la inclinación de la pendiente, pero sobre todo por la orientación de la ladera. Sin embargo, existen otros atributos del paisaje que se podrían relacionar de forma más directa con los ventarrones, como es el suelo, la mecánica de los árboles y el manejo del bosque que afectan la respuesta del bosque ante los disturbios por viento.

En los sitios sobrevolados, predomina la orientación de ladera sur y oeste. Es probable que éstas se encontraran mejor representadas ya que la mayoría de los sitios están orientados hacia el estado de Michoacán, generando ese artefacto en los

datos. También podría estar influenciado por la orientación desde la que llegó el viento durante la tormenta, que fue predominantemente oeste y suroeste.

Ya que los efectos de los disturbios por viento pueden ser significativamente diferentes entre sitios, es importante generar cartografía de alta resolución que permita conocer y comprender mejor la variabilidad espacial del bosque después de un episodio de ventarrones. La adquisición de imágenes e información espacial a través de herramientas de percepción remota puede brindar información de diferentes atributos del paisaje con alta resolución y ser de gran utilidad para la toma de decisiones en diferentes áreas del manejo forestal.

Sin embargo, no es posible caracterizar todas las áreas afectadas por ventarrones con un dron, debido a la gran extensión espacial y a la heterogeneidad espacial que caracteriza estos disturbios. Por ello, la utilización de esta herramienta debe ser adaptada a las necesidades de obtención de información, considerando las limitaciones que representa, eligiendo sitios representativos para realizar los vuelos. Los sistemas de información geográfica representan una herramienta fundamental para el procesamiento de información espacial al estudiar diferentes disturbios, ya sean de origen natural o antropogénicos.

Evaluar los efectos de ventarrones en la estructura del dosel es una primera aproximación en la caracterización de su régimen de disturbio a nivel del paisaje y la comunidad arbórea. Establecer una estructura mínima del sistema a evaluar podría ayudar a abordar de manera sistemática los efectos que tiene un disturbio en los diferentes niveles de organización de un ecosistema.

El conocimiento de los atributos del régimen de disturbio permitirá predecir la probabilidad y características de los daños en el ecosistema y con ello plantear estrategias específicas en los programas de manejo. Debido a la dificultad en la predicción de eventos de ventarrones (por ser eventos estocásticos naturales y porque puede producirse en diversas condiciones sinópticas) y sus efectos ante las proyecciones de cambio climático es importante actuar bajo el principio de

precautoriedad. Por ello el manejo no solo debe centrarse en los efectos del disturbio, sino en la respuesta de las especies.

Por lo anterior, este estudio representa una primera aproximación en la caracterización de un disturbio por viento en un bosque de coníferas bajo categoría de reserva de la biosfera en México, a través de la evaluación de sus efectos en la integridad de la estructura del dosel y la cobertura forestal resultante. También contribuye a la comprensión teórica de la relación entre los disturbios por viento y factores topográficos, con aportes de información que pueden ayudar a establecer protocolos pre y post ventarrones.

## Bibliografía

**Addati, G. A. y Pérez, L. G.** (2014) *Introducción a los UAV's, Drones o VANTs de uso civil*. Serie Documentos de Trabajo, No. 551, Universidad del Centro de Estudios Macroeconómicos de Argentina (UCEMA), Buenos Aires, Argentina, (pp 1-9).

**Anderson, K. y Gaston K. J.** (2013) *Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology*. *Frontiers in Ecology and the Environment* 11(3) Environment and Sustainability Institute, University of Exeter, Penryn, Cornwall, United Kingdom (pp.138-146).

**Attiwill P. M.** (1994) *The disturbance of forest ecosystems: the ecological basis for conservative management*. School of Botany, The University of Melbourn. *Forest Ecology and Management*, 63. Elsevier Science B. V. Parville, Australia. (pp. 247-300).

**Auslander, M., Nevo, E. e Inbar, M.** (2003) *The effects of slope orientation on plant growth developmental instability and susceptibility to herbivores*. *Journal of Arid Environments* No. 55 (pp. 405-416).

**Banu, T. P, Borlea, G. F. y Banu, C.** (2016) *The Use of Drones in Forestry*. *Journal of Environmental Science and Engineering B* 5. University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine "King Michael I of Romania", Timioara, Rumania (pp. 557-562).

**Battisti, C., Poeta, G. y Fanelli, G.** (2016). *An Introduction to Disturbance Ecology, Chapter 2 The concept of disturbance*. Springer International Publishing Switzerland. *Environmental Science and Engineering* (pp 7-12).

**Bidegain, M. D.** (2010). *Masas de aire y frentes*. Curso de taller de introducción a la meteorología 2010. Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera (pp. 1-11).

**Brenner, L.** (2006) *Áreas naturales protegidas y ecoturismo: el caso de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México*. Relaciones. Estudios de Historia y Sociedad XXVII. El Colegio de Michoacán, A. C, Zamora, México (pp. 237-265).

**Brower, L.P., Kust, D.R., Rendon-Salinas, E., Serrano, E.G., Kust, K.R., Miller, J., Fernandez del Rey, C., y Pape, K.** (2004) *Catastrophic winter storm mortality of monarch butterflies in Mexico during January 2002*. En K.S. Oberhauser y M.J. Solensky (Ed.), *The monarch butterfly: biology and conservation* (pp. 151-166), Ithaca, Estados Unidos de América, Cornell University Press.

**Brower, L. P., Williams, E. H., Jaramillo-López, P., Kust, D. R., Slayback, D. A. y Ramírez, M. I.** (2017) *Butterfly Mortality and Salvage Logging from the March 2016*

*Storm in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve in Mexico*. American Entomologist, Vol. 63 No. 3 (pp. 151-164).

**Calderon-Aguilera, L., E., Rivera-Monroy, V. H., Porter-Bolland, L., Martínez-Yrizar, A., Ladah, L. B., Martínez-Ramos, M., Alcocer, J., Santiago-Pérez, A. L., Hernandez-Arana, H. A., Reyes-Gómez, V. M., Pérez-Salicrup, D. R., Díaz-Nuñez, V., Sosa-Ramírez, J., Herrera-Silveira, J. y Búrquez, A.** (2012). *An assessment of natural and human disturbance effects on Mexican ecosystems: current trends and research gaps*. Biodiversity and Conservation 21. Springer International Publishing Switzerland. (pp 589-617).

**Calvert, W. H., Zuchowski, W. y Brower, L. P.** (1983). *The Effect of Rain, Snow and Freezing Temperatures on Overwintering Monarch Butterflies in Mexico*. Biotropica Vol. 15, No. 1 (pp. 42-47).

**Camarero, J. J y Rozas, V.** (2006). *Técnicas de análisis espacial de patrones de superficies y detección de fronteras aplicadas en ecología forestal*. Sistemas y Recursos Forestales. Vol. 15, (pp. 66.87).

**Cámara Sánchez, A. O.** (2005). *Método contextual para fusión de datos*. (Tesis de maestría) Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F., Ciudad Universitaria.

**Carlón-Allende, T., Mendoza, M. E., Villanueva-Díaz, J., Pérez-Salicrup, D. R.** (2015) *Análisis espacial del paisaje como base para muestreos dendrocronológicos: El caso de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México*. Madera y Bosques, Vol. 21, No. 2 (pp. 11-22).

**Champo-Jiménez, O., Valderrama-Landeros, L. y España-Boquera, M. L.** (2012) *PÉRDIDA DE COBERTURA FORESTAL EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA MARIPOSA MONARCA, MICHOACÁN, MÉXICO. (2006-2010)*. Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente Vol. 18, No. 2, Universidad Autónoma de Chapingo, Chapingo México (pp.143-157).

**Claros Zelaya, R. A., Guevara Aguilar, A. E. y Pacas Cruz, N. R.** (2016). *Aplicación de fotogrametría aérea en levantamientos topográficos mediante el uso de Vehículos Aéreos No Tripulados* (Tesis de licenciatura) Universidad de El Salvador, San Miguel, El Salvador.

**Collin, J-F., Jourez, B. y Hebert, J.** (2006a) *La problématique chablis, s'y préparer et gérer la crise ! (1<sup>ère</sup> partie)* Forêt Wallonne No. 80 Bélgica, Louvain-La-Neuve (pp. 3-12).

**Collin, J-F., Jourez, B. y Hebert, J.** (2006b) *La problématique chablis, s'y préparer et gérer la crise ! (2<sup>ème</sup> partie)* Forêt Wallonne No. 80 Bélgica, Louvain-La-Neuve (pp. 13-26).

**CONANP** (2001). *Programa de manejo de la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca*. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, México, D. F. (pp. 20, 21).

**Cornejo-Tenorio, G., Casas, A., Farfán, B., Villaseñor, J. L. e Ibarra Martínez, G.** (2003). *Flora y vegetación de las zonas núcleo de la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca, México*. Boletín de la Sociedad Botánica de México, núm. 73. México, D. F. (pp. 43-62).

**Cornejo-Tenorio G e Ibarra-Manríquez G.** (2017) *Flora of the core zones of the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico: composition, geographical affinities and beta diversity*. Botanical Sciences 95, (pp. 1-27).

**Dale, V. H. Joyce, L. A., McNulty, S., Neilson, R. P., Ayres, M. P., Flannigan, M. D., Hanson, P. J., Irland, L. C., Lugo, A. E., Peterson, C. J., Simberloff, D., Swanson, F. J., Stocks, B. J. I Wotton, B. M.** (2001). *Climate Change and Forest Disturbances*. BioScience Vol. 51 No. 9. American Institute of Biological Sciences. (pp. 723-734).

**Diario Oficial de la Federación** (2000). *Decreto por el que se declara área natural protegida, con el carácter de Reserva de la Biosfera, la región denominada Mariposa Monarca, ubicada en los municipios de Temascalcingo, San Felipe del Progreso, Donato Guerra y Villa de Allende en el Estado de México, así como en los municipios de Contepec, Senguio, Angangueo, Ocampo, Zitácuaro y Aporo en el Estado de Michoacán, con una superficie total de 56.259-07.275 hectáreas*. Primera sección, Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. (p. 1).

**de Langre, E.** (2008) *Effects of Wind on Plants*. Department of Mechanics, Laboratoire d'Hydrodynamique. The Annual Review of Fluid Mechanics Vol. 40 (pp. 141-168).

**Galicia, L., García Romero, A., Gómez-Mendoza, L. y Ramírez, M. I.** (2007) *Cambio de uso de suelo y degradación ambiental*. Ciencia. Vol. 58 No. 4 (pp. 50-60).

**Gardiner B. y Stacey G.** (1996) *Designing Forest Edges to Improve Wind Stability*. Forestry Commission Technical Paper 16. Escocia, Edimburgo (pp. 1-7).

**Gardiner, B, Byrne, K., Hale, S., Kamimura, K., Mitchell, S. J., Peltola, H. y Ruel, J.-C.** (2008) *A review of mechanistic modelling of wind damage risk to forest*. Forestry Vol. 81, No. 3, Institute of Chartered Foresters (pp. 447-463).

**Gómez-Pompa, A. y Dirzo, R.** (1995) *Reserva Especial de la Biosfera Mariposa Monarca*. En A. Gómez-Pompa y R. Dirzo (Ed). Reservas de la biosfera y otras áreas

naturales protegidas de México (pp. 92-95), México, Instituto Nacional de Ecología y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

**González, M. E., Amoroso, M., Lara, A., Veblen, T. T., Donoso, C., Kitzberger, T., Mundo, I., Holz, A., Casteller, A., Paritsis, J., Muñoz, A., Suárez, L. y Promis, A.** (2014) *Capítulo 12. Ecología de disturbios y su influencia en los bosques templados de Chile y Argentina*. En C. Donoso, M. E., González y A. Lara (Ed.), *Ecología Forestal. Bases para el Manejo Sustentable y Conservación de los Bosques Nativos de Chile*. (pp. 411-502) Chile, Ediciones Universidad Austral de Chile (UACH).

**González-Jorge, H., Martínez-Sánchez, J., Bueno, M. y Arias P.** (2017) *Unmanned Aerial Systems for Civil Applications: A Review*. *Drones* 1 (1), 2 (pp. 1-19).

**Guerrero Vizcaino, C.** (2016) *Regeneración de Abies religiosa en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca*. (Tesis de licenciatura) Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia, Michoacán, México.

**Guo, X., Coops, N. C., Gergel, S. E., Bater, C. W., Nielsen, S. E., Stadt, J. J. y Drever, M.** (2018) *Integrating airborne lidar and satellite imagery to model habitat connectivity dynamics for spatial conservation prioritization*. *Landscape Ecology* Vol. 33. Springer Science+Business parte de Springer Nature (pp. 491-511).

**Hobbs, R. J. y Huenneke, L. F.** (1992) *Disturbance, Diversity, and Invasion: Implications for Conservation*. *Conservation Biology* Vol. 6, No. 3, (pp. 324-337).

**Honey-Rosés, J., Maurer, M., Ramírez, M. I. y Corbera, E.** (2018) *Quantifying active and passive restoration in Central Mexico from 1986-2012: assessing the evidence of a forest transition*. *Restoration Ecology* Vol. 26, No. 6 (pp. 1180-1189).

**Inzunza Bustos, J.** (2012) *Capítulo 8. Circulación de la atmósfera*. En J. Inzunza Bustos (Ed.), *Meteorología Descriptiva*. (pp. 225-260) Santiago, Chile. Universitaria.

**Ionut, S. y Bogdan, M.** (2012) *Geographic information systems (GIS) application for windthrow mapping and management in Iezer Mountains, Southern Carpathians*. *Journal of Forestry Research* 23(2) Northeast Forestry University and Springer-Verlag Berlin Heidelberg (pp. 175-184).

**IPCC** (1997) *Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el Segundo Informe de Evaluación del IPCC*. (pp. 3. 9-12).

**IPCC** (2012) "Resumen para responsables de políticas" *Informe especial sobre la gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático*. En C. B. Field, C. B., V. Barros, T. F. Stocker, D. Qin, D. J. Dokken, K. L. Ebi, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, G. -K. Plattner, S. K. Allen, M.

Tignor, y P. M. Midgley (Ed.), Informe especial de los Grupos de trabajo I y II del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (pp. 1-19) Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, Nueva York, Estados Unidos de América.

**Koh, L. P. y Wich S. A.** (2012) *Dawn of drone ecology: low-cost autonomous aerial vehicles for conservation*. Tropical Conservation Science Vol. 5(2), (pp. 121-132).

**López García, J. y Navarro Cerrillo, R. M.** (2013) *Cambios de cobertura forestal con fotografías aéreas digitales en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca*. Cambio climático y sistemas socioecológicos (pp. 49-62).

**López García, J., Prado Molina, J., Manzo Delgado, L. y Peralta Higuera, A.** (2015) *Monitoring changes of forest canopy density in a temperate forest using high-resolution aerial digital photography*. Investigaciones Geográficas, Boletín No. 90, Instituto de Geografía, UNAM, México (pp. 59-74).

**López Sánchez, J. G.** (2018) *Uso de imágenes provenientes de vehículos aéreos no tripulados para cuantificar el impacto de tala ilegal*. (Tesis de licenciatura) Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia, Michoacán, México.

**Luis-Martínez, J. C., Luna-Cavazos, M., Vibrans, H. y Flores-Cruz, M.** (2020) *Atributos ecológicos y de hábitat de las especies suculentas del área natural protegida monumento natural Yagul, Oaxaca, México*. Botanical Sciences No. 98 Vol. 1 (pp. 36-49).

**Luna Niño, R. B.** (2016) *Interacción de los frentes fríos con la Sierra Madre Oriental*. (Tesis de maestría) Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, Ensenada, Baja California, México.

**Magaña, V., Pérez, J. L. y Conde, C.** (1998) *El fenómeno de El Niño y la oscilación del sur. Sus impactos en México*. Ciencias 51, julio-septiembre (pp. 14-18).

**Manson, R. H., Jardel Peláez, E. J., Jiménez Espinosa, M., Escalante Sandoval, C. A., Martínez Ramos, M., Asbjornsen, H., Contreras Martínez, S., Rodríguez-Trejo, D. A., Santana C., E., Arreola Muñoz, A. V., Sánchez-Cordero, V., Magaña Rueda, V., Gómez Mendoza, L. y Pérez Maqueo, O.** (2009) *Capítulo 3. Perturbaciones y desastres naturales: impactos sobre las ecorregiones, la biodiversidad y el bienestar económico*. En Capital natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio, CONABIO, México (pp. 131-184).

**Martínez-Ramos, M., Alvarez-Buylla, E., Sarukhan, J. y Pinero, D.** (1988). *Treefall Age Determination and Gap Dynamics in a Tropical Forest*. Journal of Ecology Vol. 76: (pp. 700–716).

- Martínez-Ramos M.** (1994) *Regeneración natural y diversidad de especies arbóreas en selvas húmedas*. Centro de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México. Distrito Federal, México Bol. Soc. Bot. México 54 (pp. 174-224).
- Martínez-Torres, H., L.** (2016) *The importance of the traditional fire knowledge system in a subtropical montane socio-ecosystem in a protected nature area*. International Journal of Wildland Fire Vol 25, No. 9. CSIRO Publishing (pp. 911-921).
- Mazzola, M. B., Kin, A. G., Morici, E. F., Babinec, F. J. y Tamborini, G.** (2008) *Efecto del gradiente altitudinal sobre la vegetación de las Sierras de Lihue Calel (La Pampa, Argentina)*. Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica, No. 43 (pp. 103-119).
- Miller, D. R., Quine, C. P. y Hadley, W.** (2000). *An investigation of the potential of digital photogrammetry to provide measurements of forest characteristics and abiotic damage*. Forest Ecology and Management 135. Elsevier (pp 279-288).
- Mitchell, S. J.** (2012). *Wind as a natural disturbance agent in forest: a synthesis*. University of British Columbia, Vancouver, Canada, Forestry. (pp 147-157).
- Mitchell S. J y Ruel J-C.** (2015). *Modeling Windthrow at Stand and Landscape Scales*. En A. H. Perera et al. (Eds.), Simulation Modeling of Forest Landscape Disturbances (pp. 17-43), Springer International Publishing Switzerland.
- Moore, J. R., Manley, B. R., Park, D. y Scarrott, C. K.** (2013) *Quantification of wind damage to New Zealand's planted forests*. Forestry No.83 (pp. 173-183).
- Moore, J. R. y Watt, M. S.** (2015) *Modelling the influence of predicted future climate change on the risk of wind damage within New Zealand's planted forests*. Global Change Biology 21 (pp. 3021-3035).
- Mumbone, M., Bennet, R., Gerke, M. y Volkmann, W.** (2015) *Innovations in boundary mapping: Namibia, customary lands and UAVs*. En Linking land tenure and use for shared prosperity. 2015 World Bank conference on land and poverty llevado a cabo en Washington DC (pp. 1-22).
- Oliver C. D. y Larson B. C.** (1996) *Chapter 13. Development of multicohort stands*. En Oliver C. D. y Larson B. S. (Eds.) Forest Stand Dynamics (pp. 295-314), Estados Unidos de América.
- Paniagua Ruiz, I.** (2013) *Unidades ambientales y dinámica de cambio en cubiertas del suelo. Propuesta de geoportal para la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca*. (Tesis de maestría) Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia, Michoacán, México.
- Peltola, H., Kellomäki, S., Väisänen, H. e Ikonen V.-P-** (1999) *A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of Scots*

*pine, Norway spruce, and birch*. Canadian Journal of Forest Research Vol. 29 (pp. 647-661).

**Pickett S. T. A. y White P. S.** (1985) *Chapter 1. Natural Disturbance and Patch Dynamics: An Introduction*. En S. T. A Pickett y P. S. White (Eds.), *The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics* (pp. 3-9), Estados Unidos de América, Academic Press.

**Pickett STA, Kolasa J, Armesto JJ, Collins SL.** (1989) *The ecological concept of disturbance and its expression at various hierarchical levels*. *Oikos* 54 (pp. 129–136).

**Pickett, S. T. A., Wu, J. y Cadenasso, M. L.** (1999) *Patch dynamics and the ecology of disturbed ground: a framework for synthesis*. *Ecosystems of Disturbed Ground*, Elsevier, Amsterdam, (pp. 707-722).

**Quine, C., Coutts, M., Gardiner, B. y Pyatt, G.** (1995) *Forest and Wind: Management to Minimize Damage*. The Forestry Authority. Bulletin 114. HMSO, London. (pp 1-14).

**Ramírez Ramírez, M. I., Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G., Salas-Canela, L.** (2015) *Chapter 13. Threats to the availability of overwintering habitat in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve: land use and climate change*. En K. S., Oberhauser, K. R. Nail y S. Altizer (Eds.), *Monarchs in a changing world: Biology and Conservation of an Iconic Butterfly*. Cornell University Press, Itaca, Nueva York. (pp. 157-168).

**Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M. y Sarazzi, D.** (2016) *UAV photogrammetry for mapping and 3D modelling-current status and future perspectives*. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* Vol. 38.

**Riguelle, S., Hébert, J., Jourez, B. y Rommelaere, A.** (2011) *Le plan chablis : un outil de planification d'urgence et de gestion de crise pour la forêt Wallonne*. Forêt Wallonne No. 111 Bélgica, Louvain-La-Neuve (pp. 3-9).

**Rualez Salazar, D. N.** (2018) *Pertinencia del uso de drones en la caracterización geo espacial del módulo dos Junta de Agua de riego de la comuna Morlán, Imbabura*. (Tesis de Maestría) Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador.

**Runkle, J. R.** (1985) *Chapter 2. Disturbance Regimes in Temperate Forests*. En S. T. A Pickett y P. S. White (Ed.), *The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics* (pp. 17-33), Estados Unidos de América, Academic Press.

**Rykiel, E. J.** (1985) *Toward a definition of ecological disturbance*. *Australian Journal of Ecology* 10, (pp. 361-365).

**Saad, C., Boulanger, Y., Beudet, M., Gachon, P., Ruel, J.-C. y Gauthier, S.** (2017). *Potential impact of climate change on the risk of windthrow in Eastern Canada's forest*. Climate Change Volume 143. Springer. (pp 487-501).

**Santos Clavero, D.** (2014) *Fotogrametría usando plataforma aérea UAV (Unmanned Aerial Vehicle)*. (Proyecto de fin de carrera) Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.

**Schindler, D., Bauhus, J. y Mayer, H.** (2012). *Wind effects on trees*. European Journal of Forest Research. (pp 159-163).

**Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., Martin-Benito, D., Peltoniemi, M., Vacchiano, G., Wild, J., Davide, A., Petr, M., Honkaniemi, J., Lexer, M. J., Trotsiuk, V., Mairota, P., Svoboda, M., Fabrika, M., Nagel, T. A. y Reyer, C. P. O.** (2017) *Forest disturbances under climate change*. Nature Climate Change Vol. 7 Macmillan Publishers Springer Nature (pp. 395-402).

**Serrada Hierro, R.** (2003) *Regeneración natural, situaciones, concepto, factores y evaluación*. Cuad, Soc. Esp. Cien. For. 15 (pp. 11-15).

**Servicio Meteorológico Nacional.** *Frentes Fríos*. Pronóstico Climático. México (Recuperado el 15 de mayo del 2019)  
<https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/pronostico-climatico/frentes-frios> (Sin fecha).

**Tang, L. y Shao, G.** (2015) *Drone remote sensing for forestry research and practices*. Journal of Forestry Research 26(4) Northeast Forestry University and Springer-Verlag Berlin Heidelberg (pp. 791-797).

**Turner, M. G. y Gardner, R. H.** (2015) *Chapter 6. Landscape Disturbance Dynamics*. En M. G. Turner y R. H. Gardner (Ed.), *Landscape Ecology in Theory and Practice : Pattern and Process* (2a edición) (pp. 175-228), Estados Unidos de América, Nueva York, Springer-Verlag.

**Ulanova, N. G.** (2000) *The effects of windthrow on forest at different spatial scales: a review*. Forest Ecology and Management 135, Department of Geobotany Biological Faculty, Moscow State University, Moscú, Rusia (pp. 155-167).

**Vaillancourt, M. A.** (2008) *Effets des régimes de perturbation par le chablis sur la biodiversité et les implications pour la récupération*. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction du développement socio-économique, des partenariats et de l'éducation et Service de la mise en valeur de la ressource et de territoires fauniques. Québec, Canadá (pp. 1-58).

**Vargas-Ramírez, N.** (2017) *Evaluación del potencial de uso de pequeños vehículos aéreos no tripulados para el monitoreo ambiental y la defensa territorial indígena en México.* (Tesis de maestría) Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia, Michoacán, México.

**Vázquez Paulino, J. C. y Backhoff Pohls, M. A.** (2017) *Procesamiento geo-informático de datos generados mediante drones para la gestión de infraestructura del transporte.* Publicación Técnica No. 490. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Safandilla, Querétaro, México (pp. 1-79)

**Vega, E. y Peters, E.** (2003) *Conceptos generales sobre el disturbio y sus efectos en los ecosistemas.* En O. Sánchez, E. Vega, E. Peters y O. Monroy-Vilchis (Ed.), *Conservación de ecosistemas templados de montaña en México* (pp. 137-150) México, D. F., México, Instituto Nacional de Ecología.

**Villaseñor Martínez, L. A.** (2019) *Percepción local de mapeo y monitoreo comunitario con drones para la defensa territorial indígena.* (Informe de trabajo profesional de licenciatura) Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia, Michoacán, México.

**Waldron, K., Ruel, J-C. y Gauthier, S.** (2013) *The effects of site characteristics on the landscape-level windthrow regime in the North Shore region of Quebec, Canada.* *Forestry* Vol. 86 No. 2. Institute of Chartered Foresters (pp. 159-171).

**Wallace, L., Lucieer, A., Watson, C. y Turner, D.** (2012) *Development of a UAV-LiDAR System with Application to Forest Inventory.* *Remote Sensing* (4) (pp. 1519-1543).

**White, P. S. y Jentsch, A. J.** (2001) *The Search for Generality in Studies of Disturbance and Ecosystem Dynamics.* *Progress in Botany* Vol. 62. Springer-Verlag Berlin Heidelberg (pp. 399-449).

**World Wildlife Fund** (2017) *Degradación forestal en la zona núcleo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca 2015-2016.* Resumen ejecutivo, 23 de agosto del 2017. México. (Recuperado el 02 de marzo del 2019) [https://www.wwf.org.mx/noticias/noticias\\_mariposa\\_monarca.cfm?uNewsID=309130](https://www.wwf.org.mx/noticias/noticias_mariposa_monarca.cfm?uNewsID=309130)

## Apéndice de tablas

Tabla 1. Información de la adquisición de las fotografías.

| Año de vuelo | Sitio                      | Fecha de vuelo | Altura de vuelo (metros) | Fotografías utilizadas para generar los ortomosaicos |
|--------------|----------------------------|----------------|--------------------------|--|
| 2017         | Sierra Chincua             | 15 de mayo     | 120                      | 597  |
|              | Llano de las Papas         | 20 de junio    | 110                      | 374  |
|              | Casa Blanca                | 21 de junio    | 120                      | 356  |
|              | Llano de los Conejos       | 22 de junio    | 120                      | 136  |
| 2019         | Ejido Chincua              | 24 de enero    | 120                      | 977  |
|              | Ejido San Jerónimo Pilitas | 22 de febrero  | 110                      | 158  |

Tabla 2. Caracterización espacial de los sitios sobrevolados.

| Nombre                            | Ubicación (UTM)          | Área total (ha.) | Área interpretada (ha.) | Rangos de orientación de laderas (grados) | Rangos de Pendientes (grados) |
|-----------------------------------|--------------------------|------------------|-------------------------|---|-------------------------------|
| <b>Sierra Chincua</b>             | -100.299021<br>19.673371 | 102.025          | 84.96                   | De 0.3 a 359.8                            | De 0.99 a 7.06°               |
| <b>Llano de las Papas</b>         | -100.29019<br>19.670261  | 34.796           | 25.36                   | De 97 a 325.9 (sin orientación noreste)   | De 6.89 a 41.69°              |
| <b>Llano de los Conejos</b>       | -100.266771<br>19.595552 | 9.709            | 5.44                    | De 59.4 a 351.3                           | De 1.26 a 24.51°              |
| <b>Casa Blanca</b>                | -100.244189<br>19.575991 | 29.854           | 24.76                   | De 4.1 a 350.4                            | De 1 a 26.07°                 |
| <b>Ejido Chincua</b>              | -100.295821<br>19.694835 | 16.051           | 13.48                   | De 0.6 a 359.4                            | De 1.74 a 33.19°              |
| <b>Ejido San Jerónimo Pilitas</b> | -100.236605<br>19.663386 | 10.216           | 7                       | De 3.1 a 352.1                            | De 2.74 a 22.58°              |

Tabla 3. Superficie de cobertura del dosel por sitios (expresada en porcentajes).

| Categorías de cobertura/ Sitios | Sierra Chincua | Llano de las Papas | Casa Blanca | Llano de los Conejos | Ejido Chincua | Ejido San Jerónimo Pilitas |
|---------------------------------|----------------|--------------------|-------------|----------------------|---------------|----------------------------|
| <b>Cobertura 0</b>              | 4.06           | 2.20               | 54.83       | 16.91                | 0             | 3.38                       |
| <b>Cobertura 1 – 10</b>         | 4.06           | 4.25               | 6.29        | 2.94                 | 0.29          | 12.99                      |
| <b>Cobertura 11 – 40</b>        | 42.87          | 32.96              | 17.74       | 29.41                | 7.12          | 33.89                      |
| <b>Cobertura 41 – 70</b>        | 32.39          | 34.85              | 10.16       | 37.5                 | 45.69         | 22.59                      |
| <b>Cobertura 71 - 100</b>       | 13.75          | 23.18              | 3.70        | 9.55                 | 45.69         | 11.86                      |
| <b>Sin interpretar</b>          | 2.86           | 2.52               | 7.25        | 3.67                 | 1.18          | 15.25                      |
| Total                           | 99.99          | 99.96              | 99.97       | 99.98                | 99.97         | 99.96                      |

Tabla 4. Valores de *odd ratios*, intervalos de confianza y *p* para cada uno de los predictores del modelo de regresión logística ordinal.

| Predictores                     | Odds Ratios | Intervalos de confianza | <i>p</i>         |
|---------------------------------|-------------|-------------------------|------------------|
| 0 1 - 10                        | 0.28        | 0.15 – 0.51             | <b>&lt;0.001</b> |
| 1 - 10 11 - 40                  | 0.77        | 0.59 – 1.01             | 0.174            |
| 11 - 40 41 - 70                 | 2.20        | 1.82 – 2.67             | <b>&lt;0.001</b> |
| 41 - 70 71 - 100                | 7.12        | 6.97 – 7.28             | <b>&lt;0.001</b> |
| Orientación norte               | 0.35        | 0.19 – 0.64             | <b>0.001</b>     |
| Orientación este                | 0.93        | 0.71 – 1.23             | 0.624            |
| Orientación sur                 | 1.04        | 0.85 – 1.26             | 0.722            |
| Pendiente                       | 1.04        | 1.02 – 1.06             | <b>0.001</b>     |
| O. norte * Pendiente            | 1.06        | 1.01 – 1.10             | <b>0.007</b>     |
| O. este * Pendiente             | 1.00        | 0.98 – 1.01             | 0.723            |
| O. sur * Pendiente              | 0.99        | 0.98 – 1.00             | 0.150            |
| <b>Observaciones</b>            | 611         |                         |                  |
| <b>R<sup>2</sup> Nagelkerke</b> | 0.053       |                         |                  |

## Apéndice de figuras

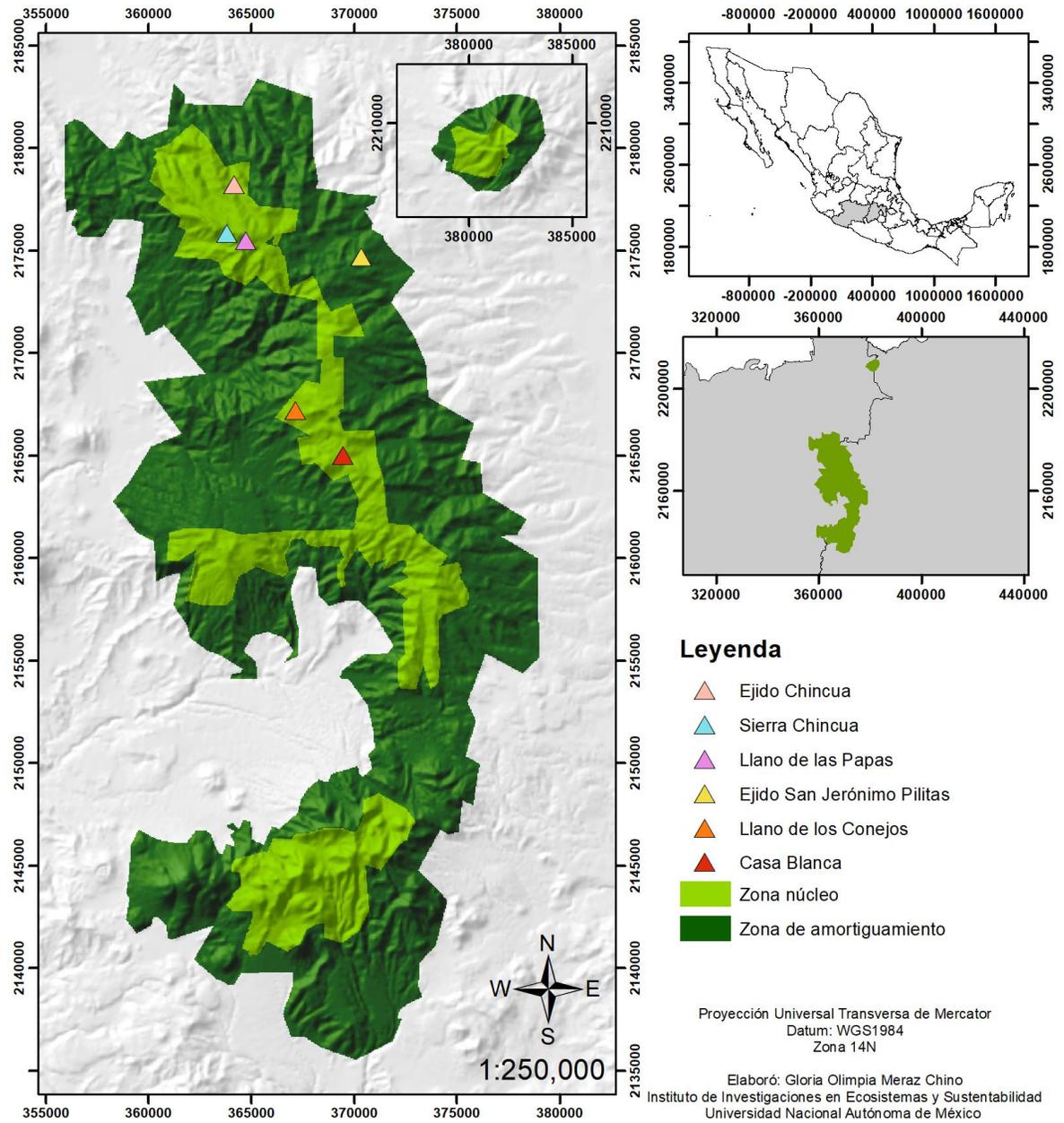


Figura 1. Mapa de ubicación de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca con la localización de los centros de los sitios sobrevolados.

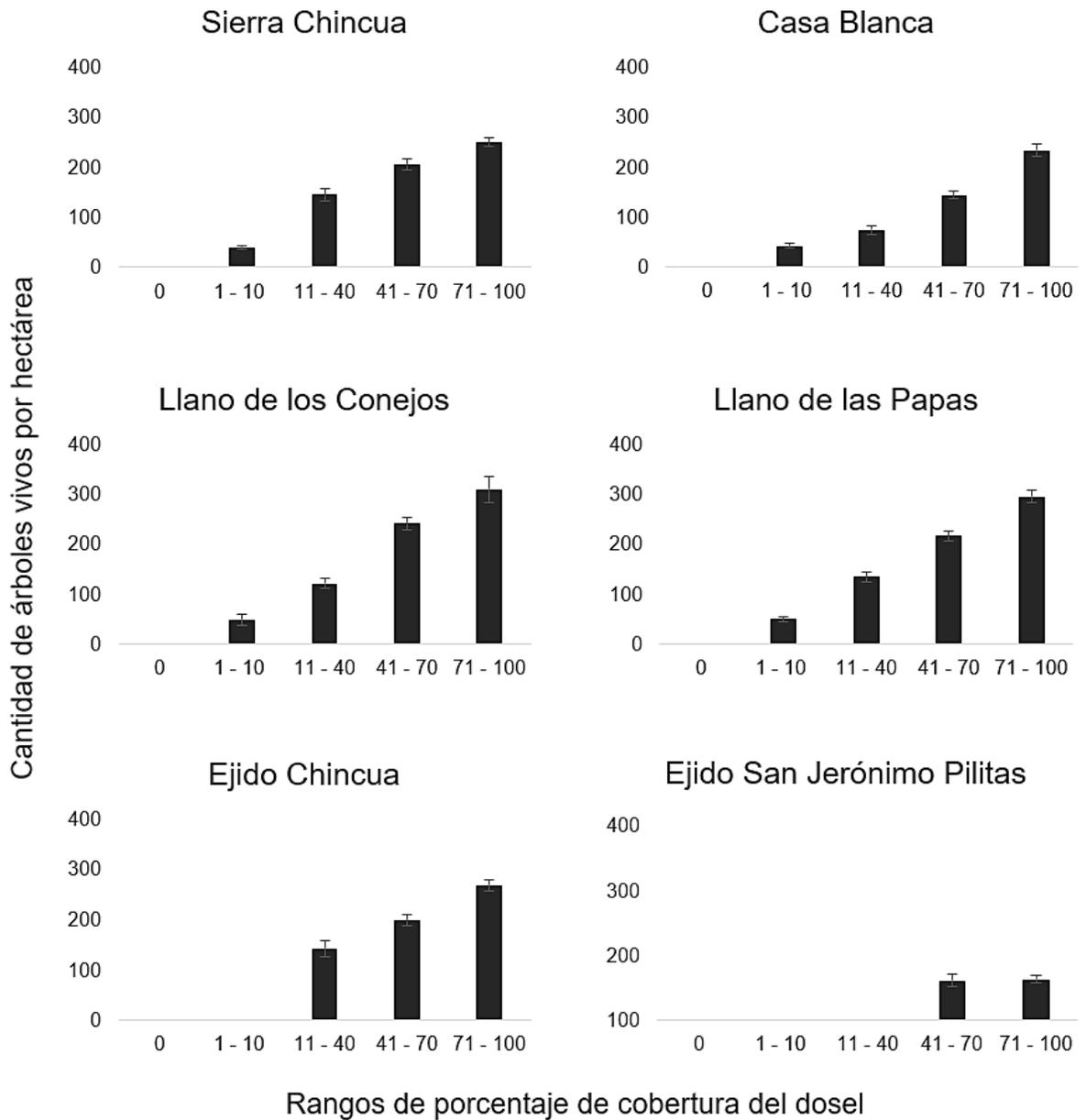


Figura 2. Densidad de árboles vivos por categorías de cobertura del dosel extrapolados a hectáreas.

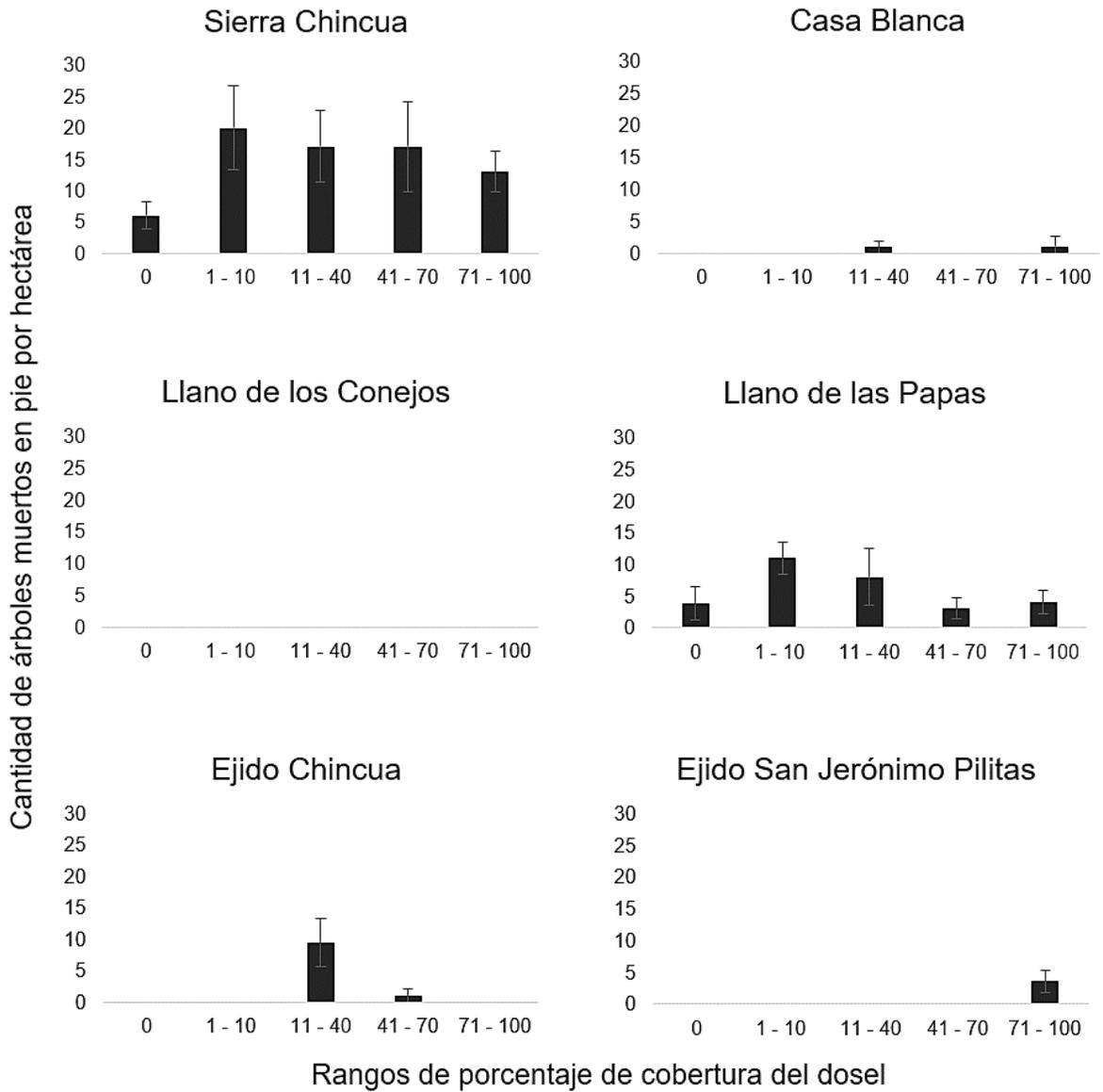


Figura 3. Densidad de árboles muertos en pie por categoría de cobertura del dosel extrapolados a hectáreas.

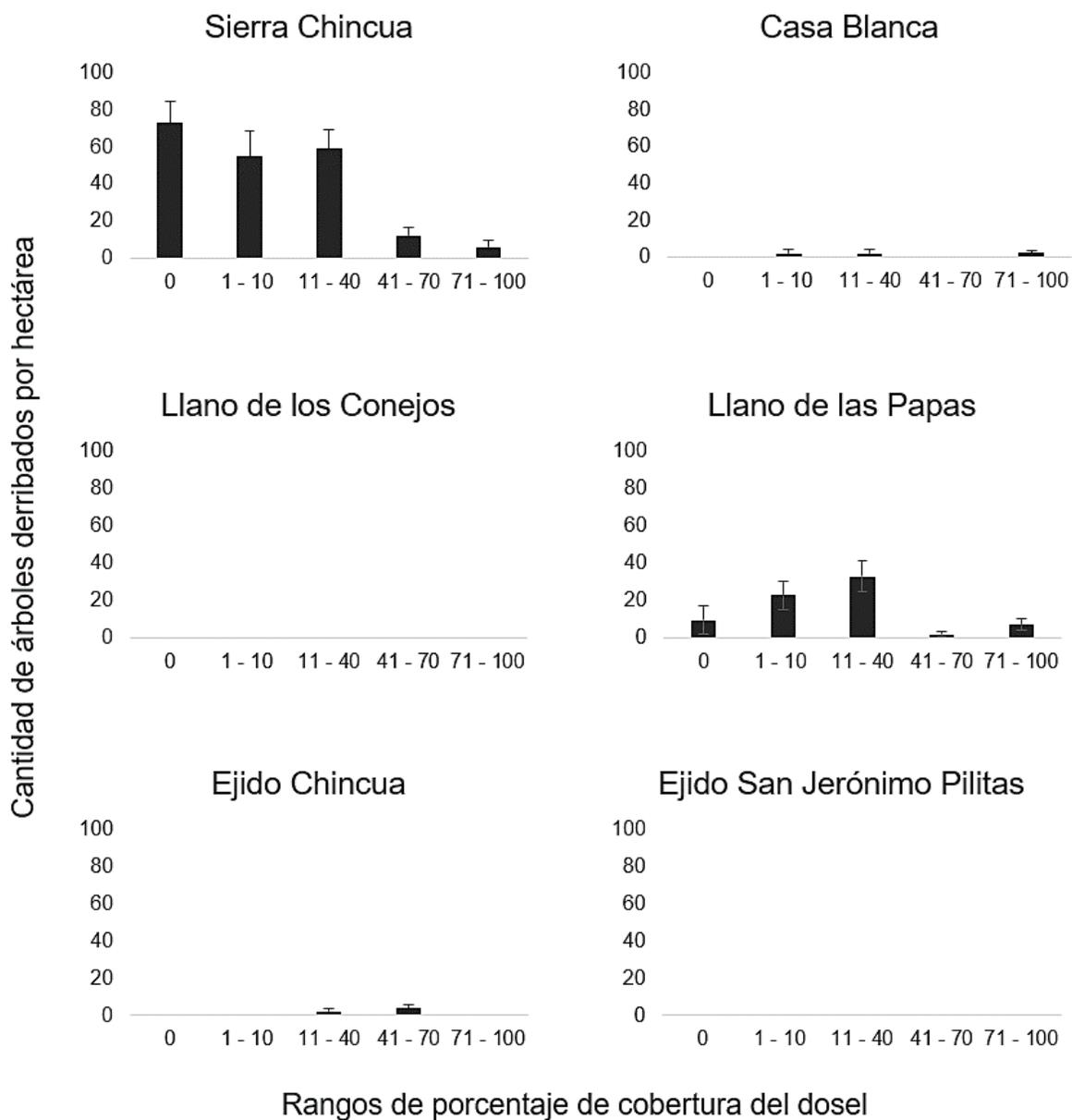


Figura 4. Cantidad de árboles derribados por categoría de cobertura del dosel extrapolados a hectáreas.

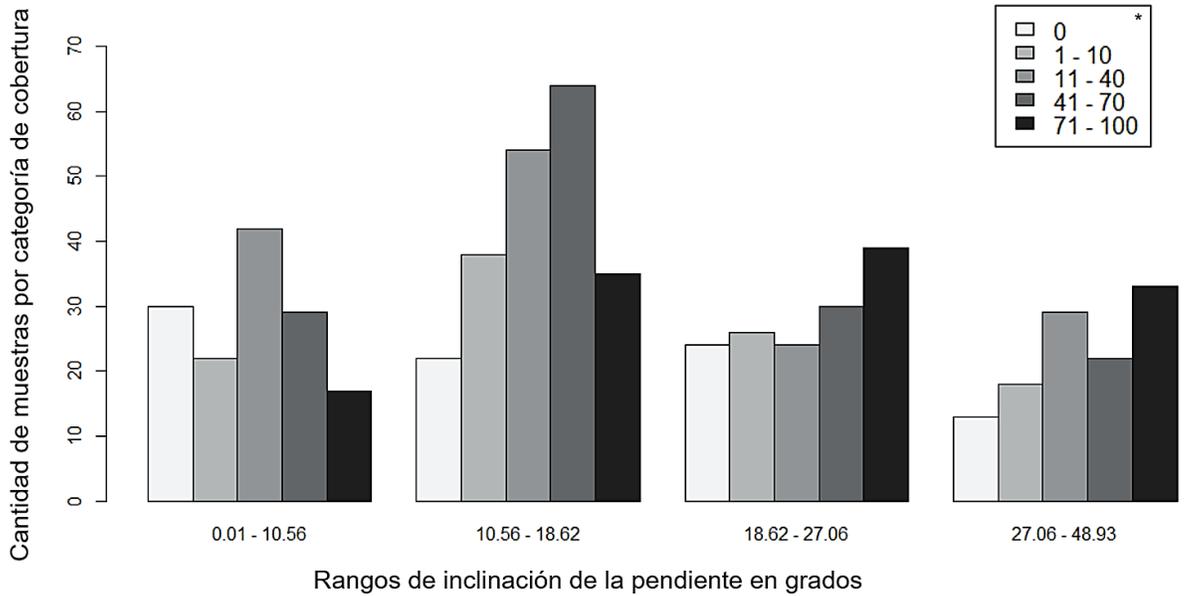


Figura 5. Conteo de cuadros por categoría de cobertura del dosel por rangos de pendiente. \*Categorías de cobertura en rangos.

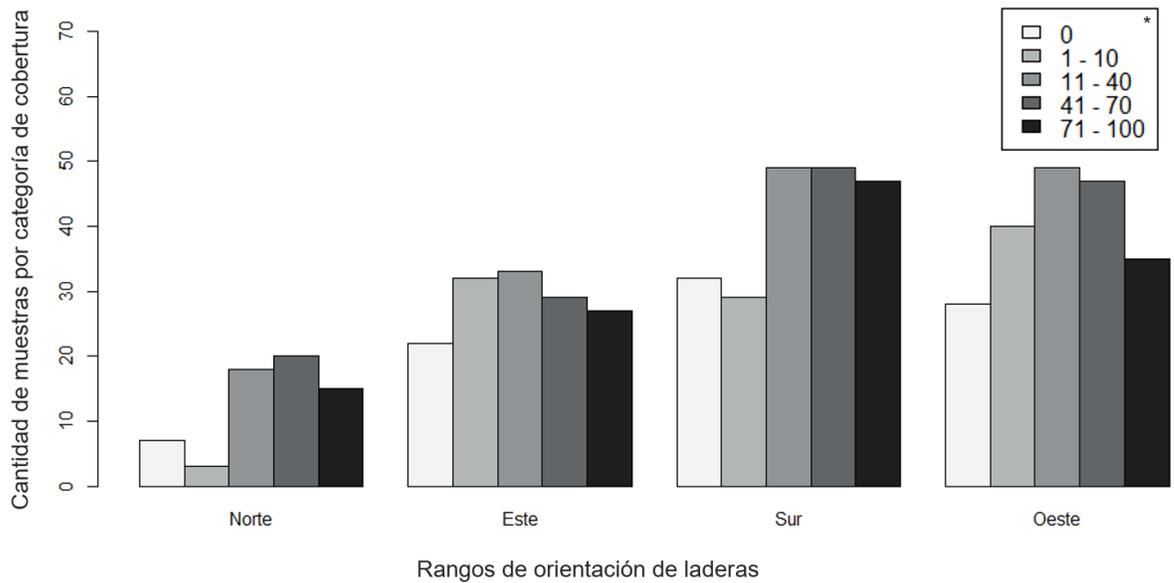


Figura 6. Conteo de cuadros por categoría de cobertura del dosel por orientación de ladera. \*Categorías de cobertura en rangos.

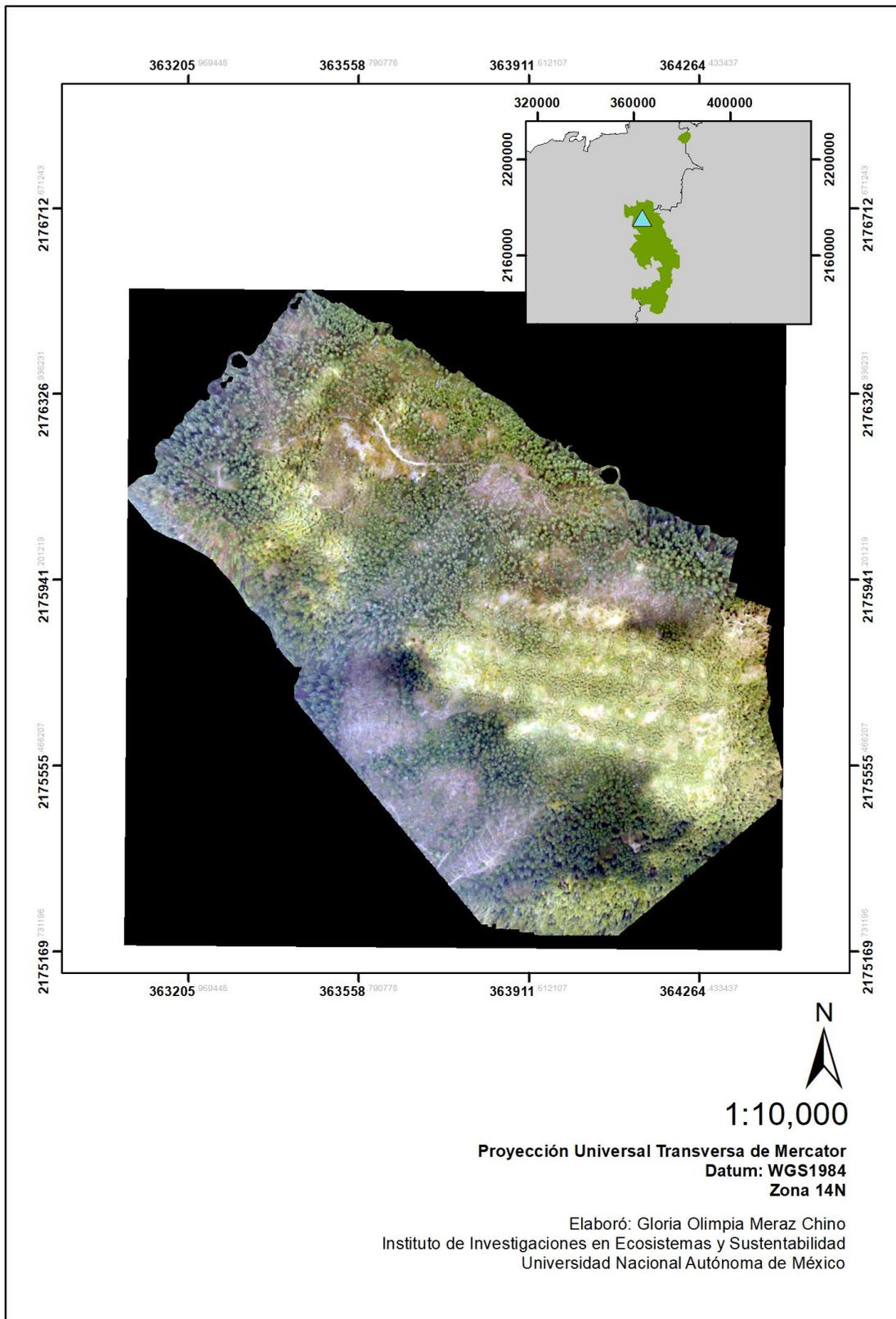


Figura 7. Ortomosaico correspondiente al sitio sobrevolado en Sierra Chincua.

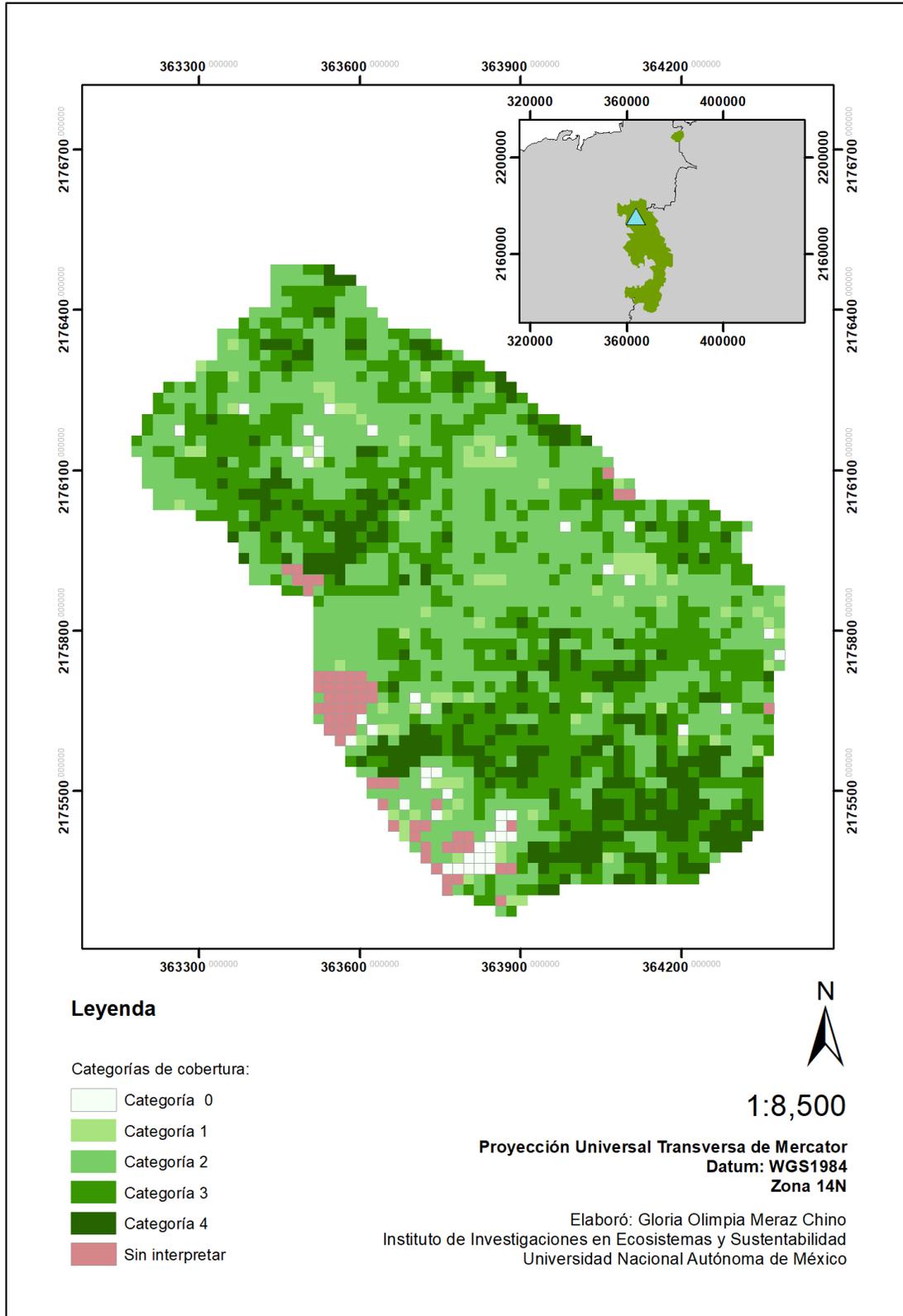


Figura 8. Mapa con la distribución de cuadros y su categoría de cobertura del dosel correspondiente a Sierra Chincua.

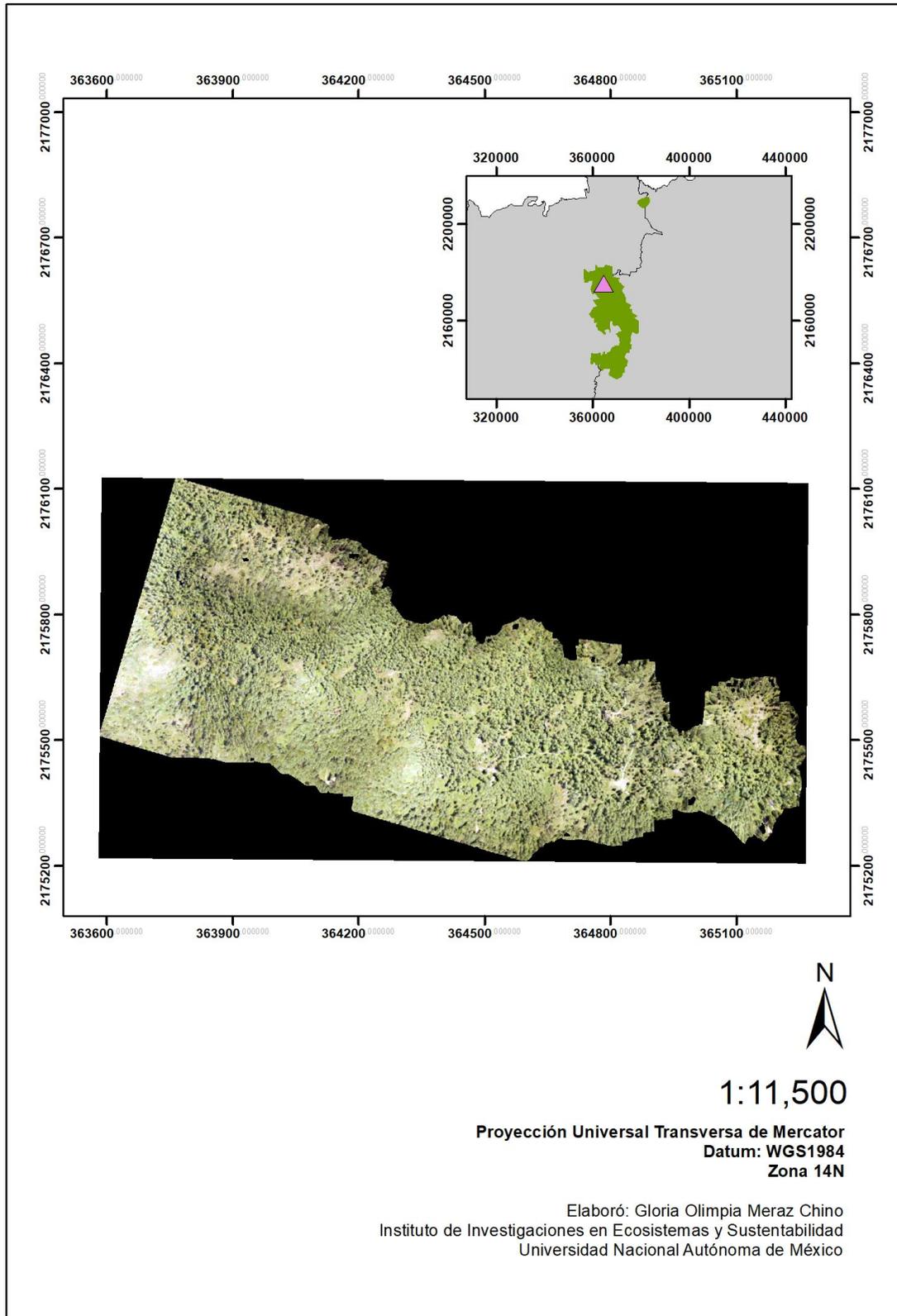


Figura 9. Ortomosaico correspondiente al sitio sobrevolado en el Llano de las Papas.

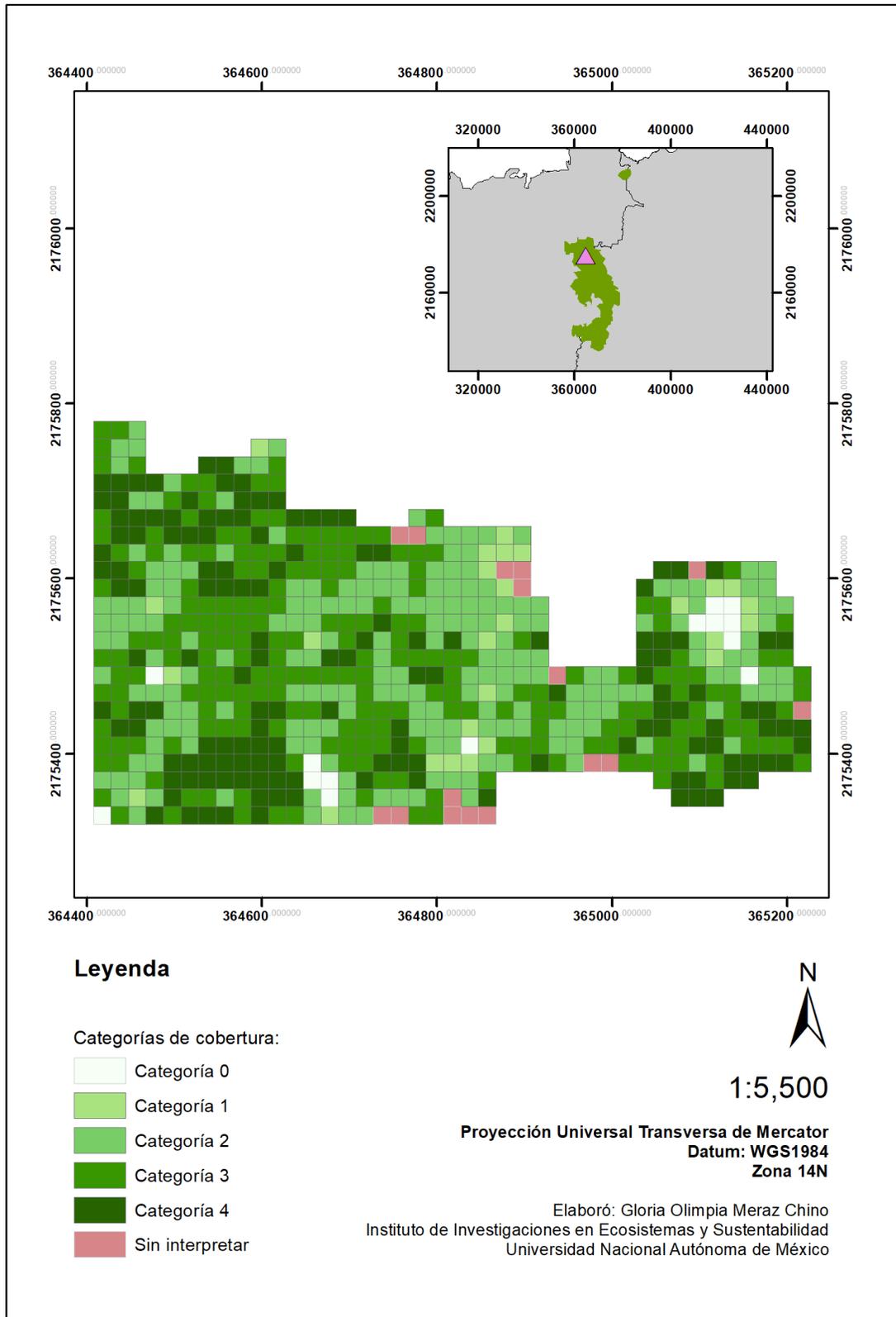


Figura 10. Mapa con la distribución de cuadros y su categoría de cobertura del dosel correspondiente al Llano de las Papas.

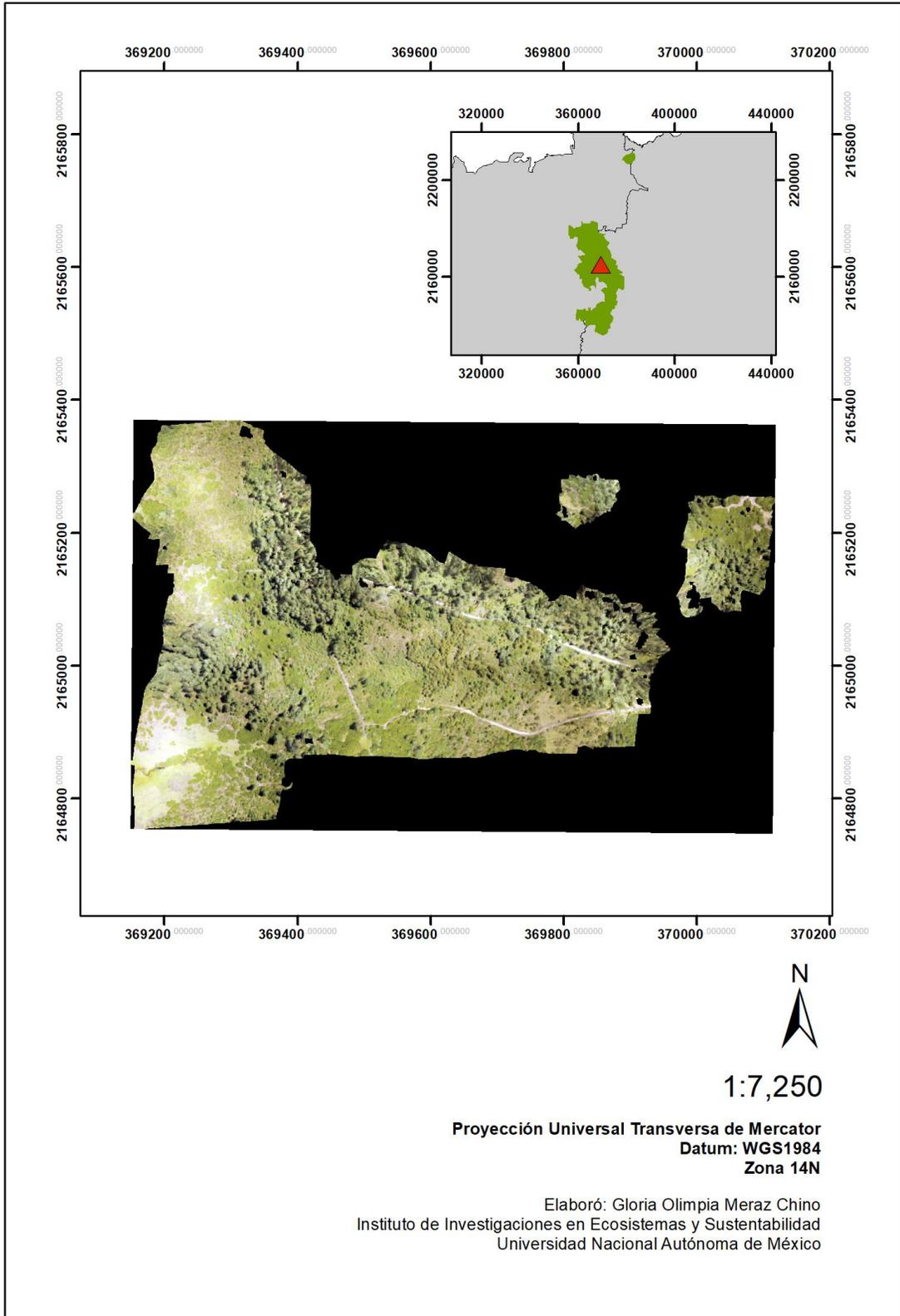


Figura 11. Ortomosaico correspondiente al sitio sobrevolado en el Ejido Casa Blanca.

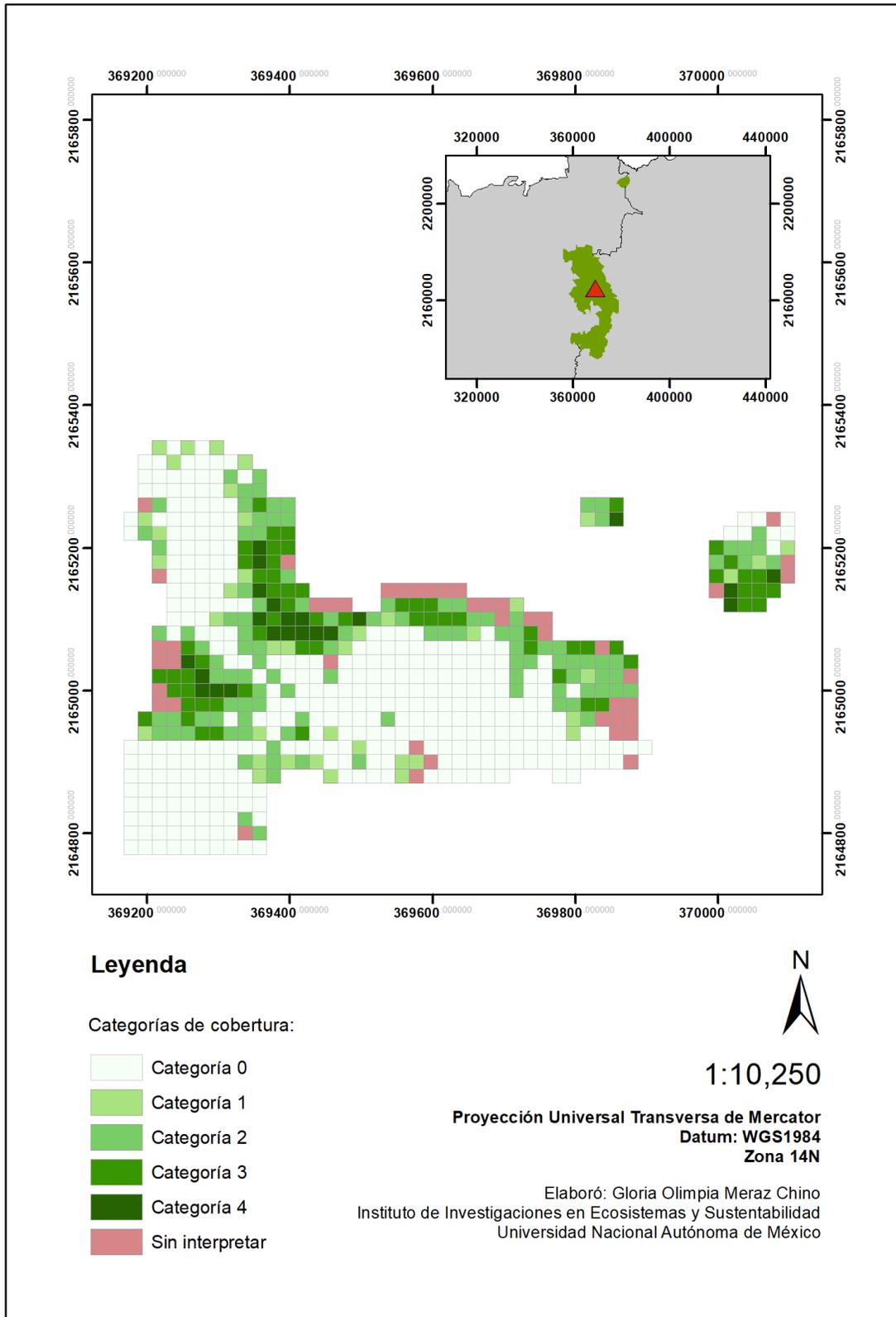


Figura 12. Mapa con la distribución de cuadros y su categoría de cobertura del dosel correspondiente al Ejido Casa Blanca.

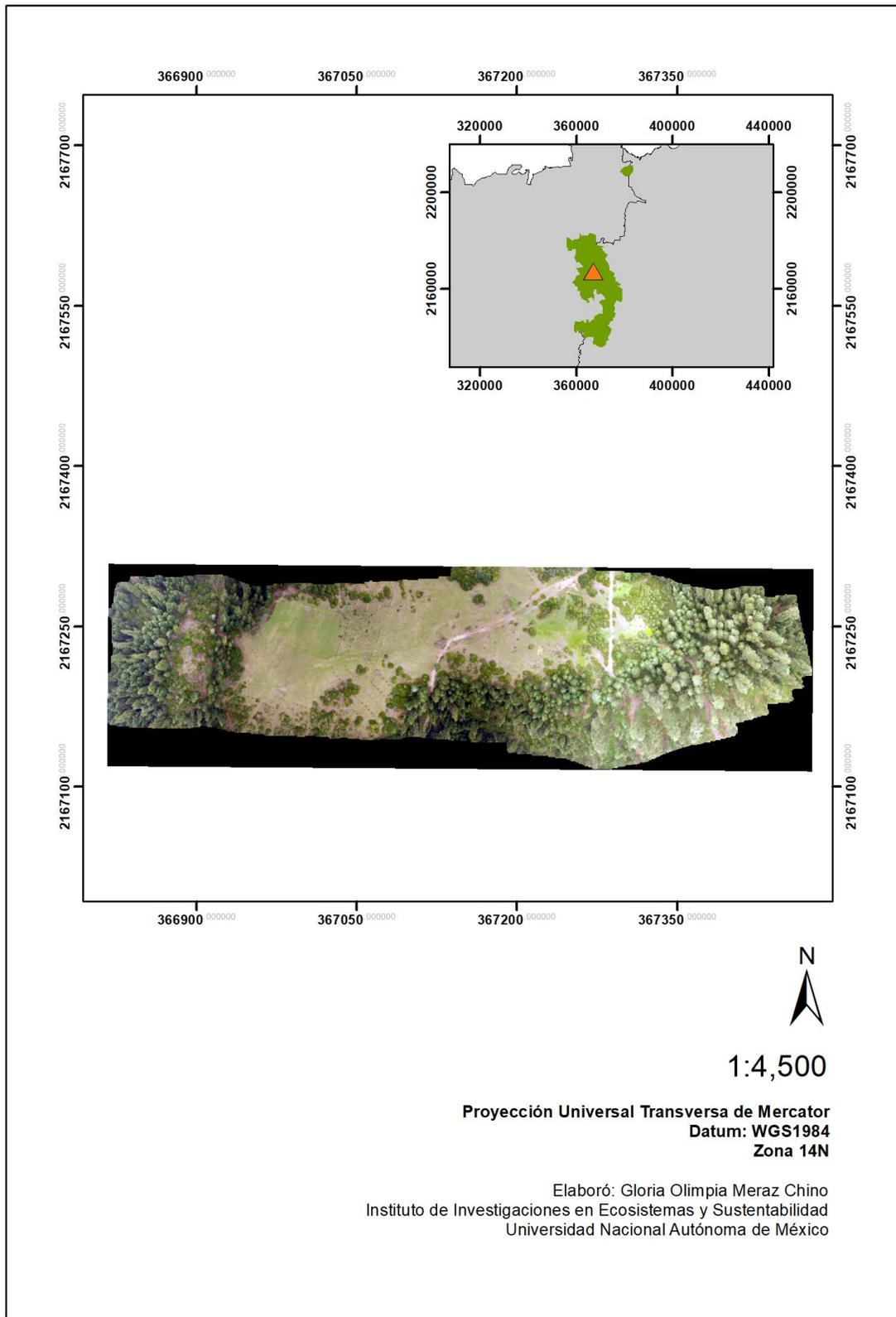


Figura 13. Ortomosaico correspondiente al sitio sobrevolado en el Llano de los Conejos.

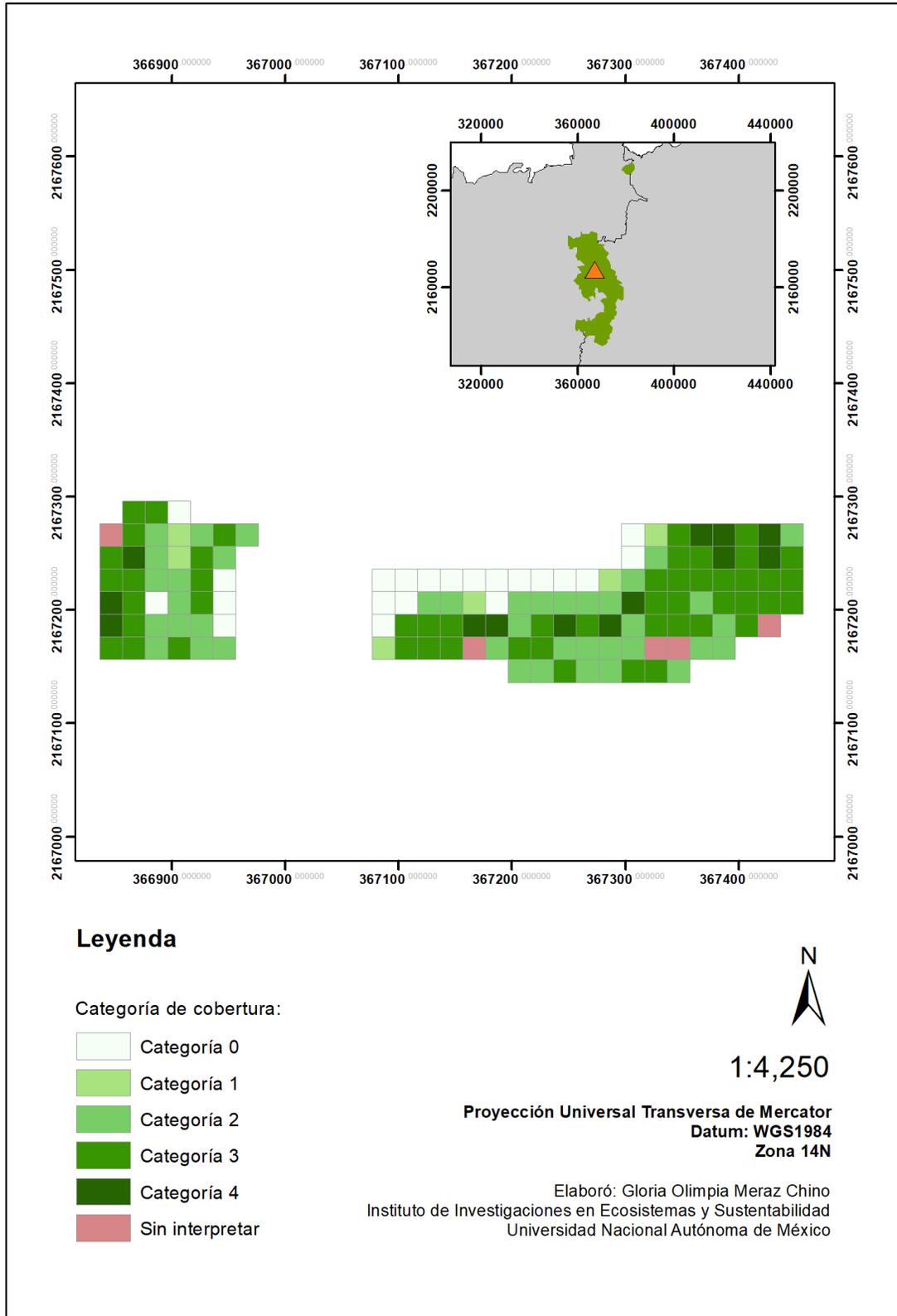


Figura 14. Mapa con la distribución de cuadros y su categoría de cobertura del dosel correspondiente al Llano de los Conejos.

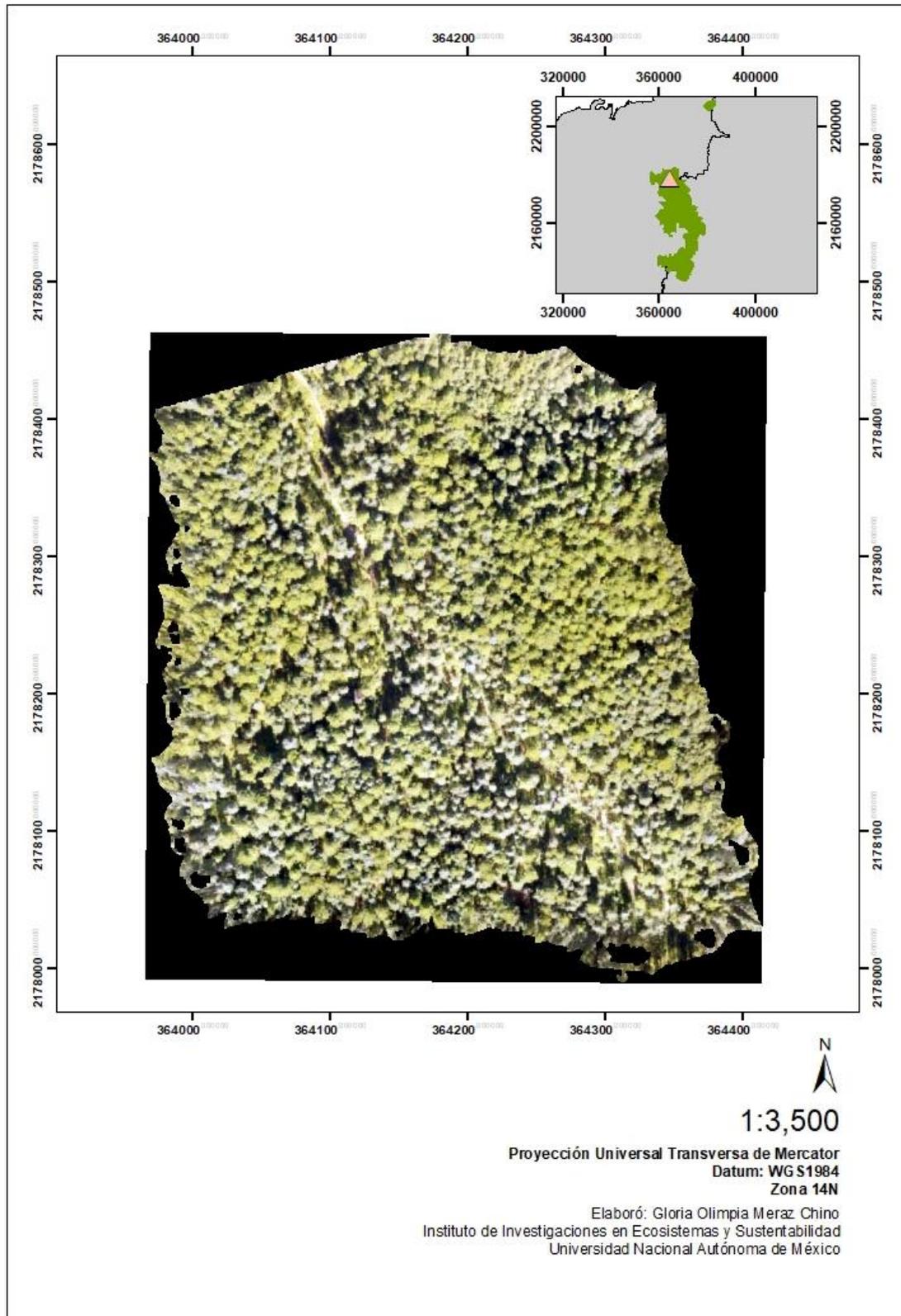


Figura 15. Ortomosaico correspondiente al sitio sobrevolado en el Ejido Chincua.

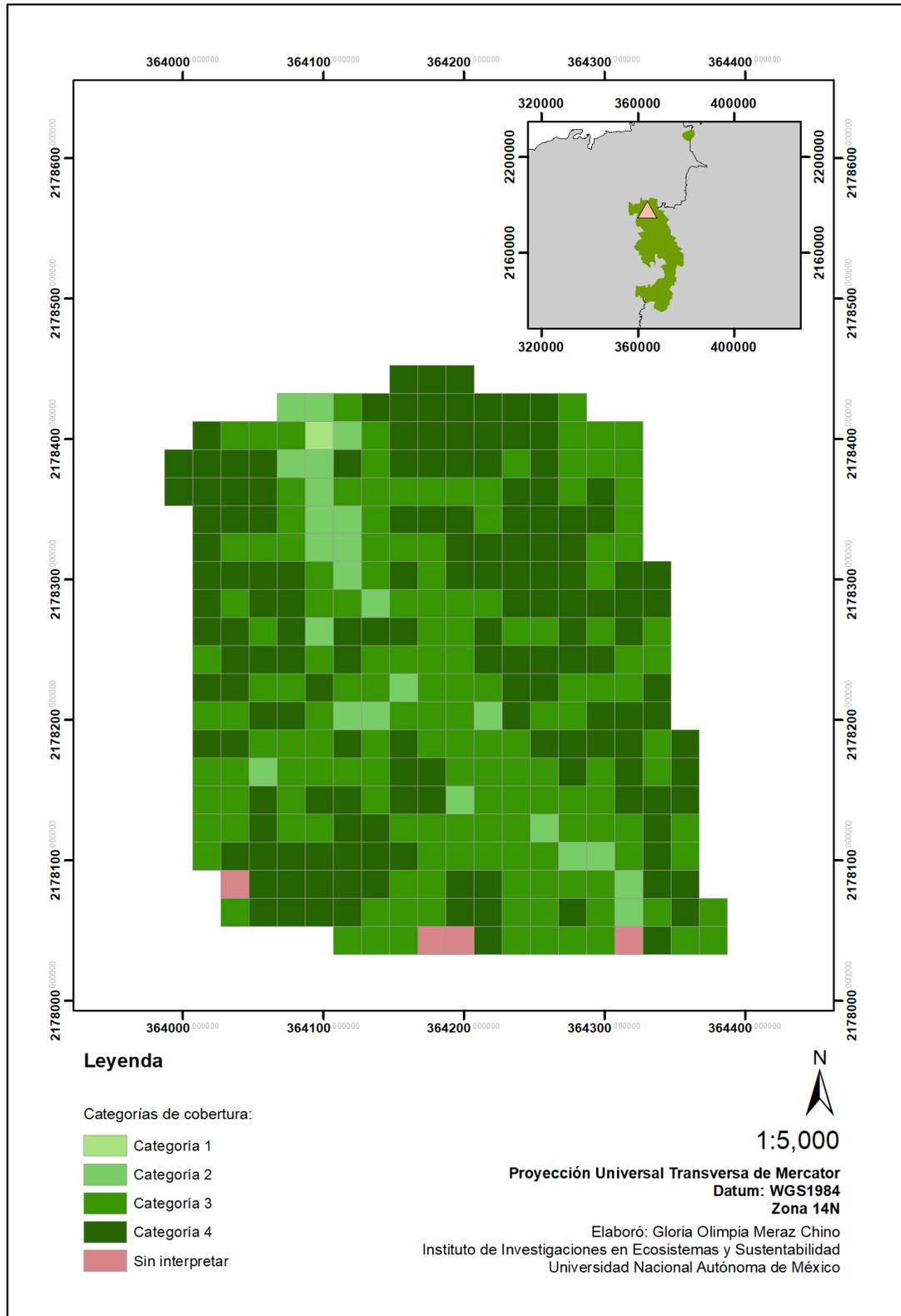


Figura 16. Mapa con la distribución de cuadros y su categoría de cobertura del dosel correspondiente al Ejido Chincua.

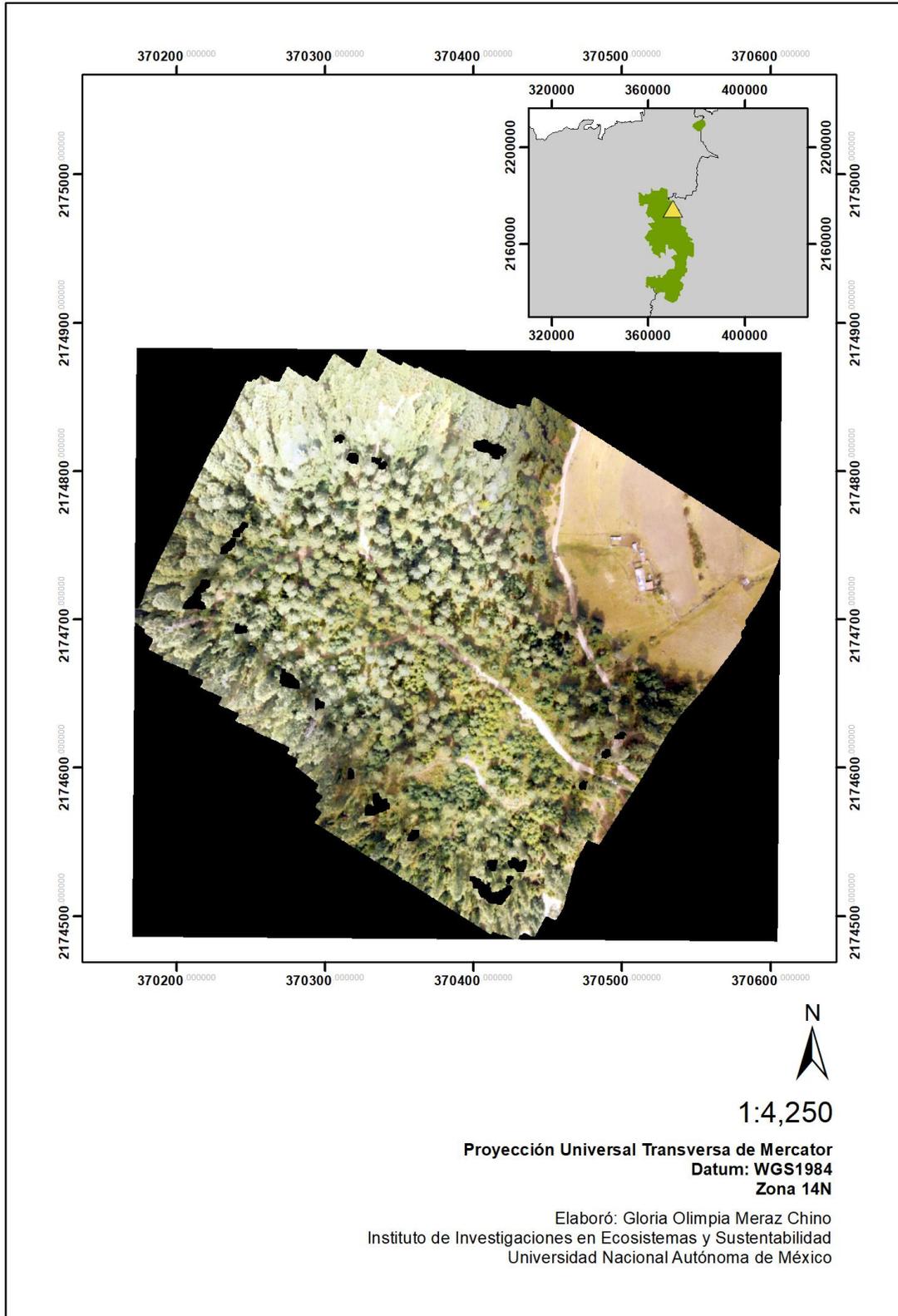


Figura 17. Ortomosaico correspondiente al sitio sobrevolado en el Ejido San Jerónimo Pilitas.

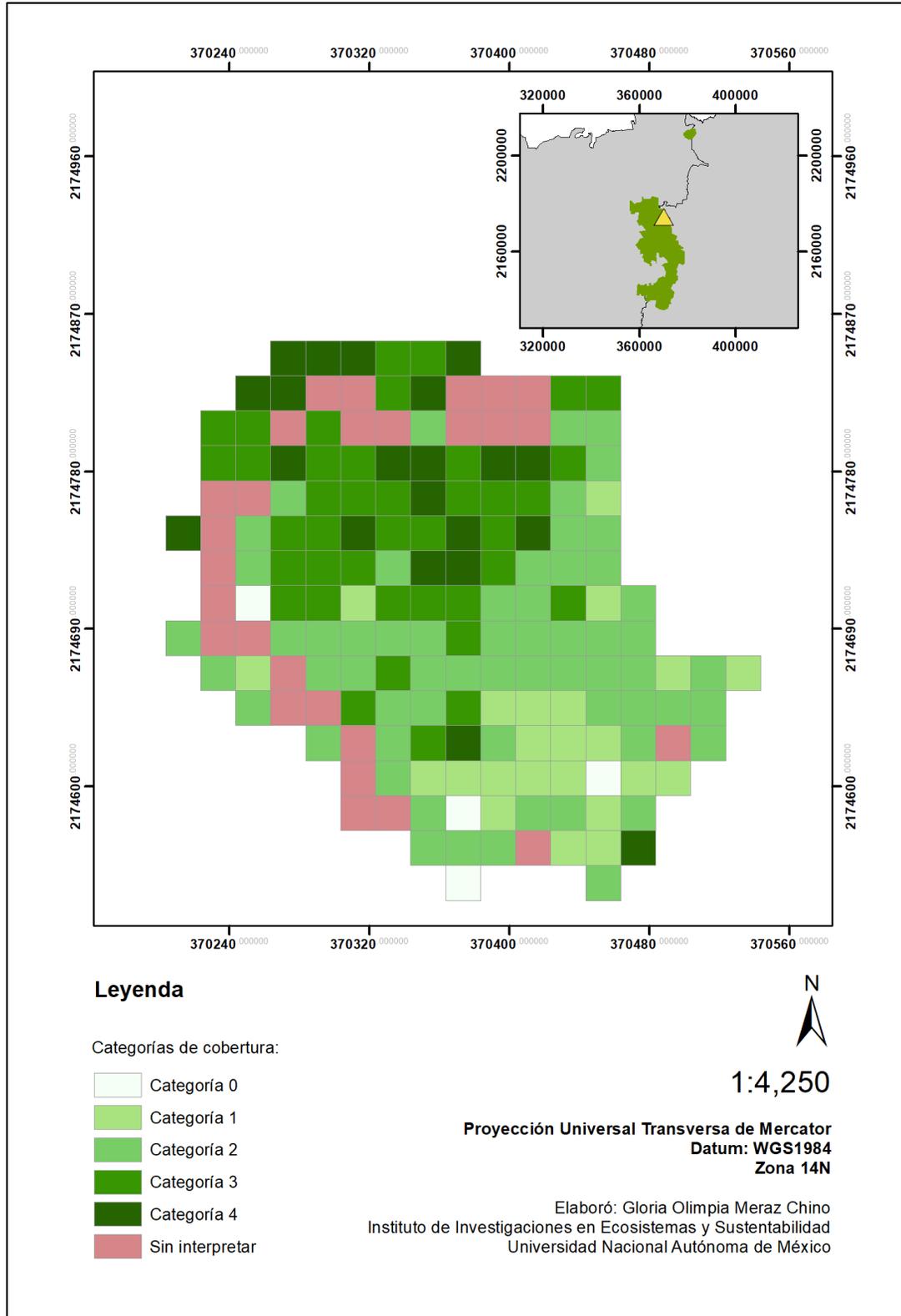


Figura 18. Mapa con la distribución de cuadros y su categoría de cobertura del dosel correspondiente al Ejido San Jerónimo Pilitas.

## Anexos

Tabla 5. Plantilla de apoyo para la interpretación de la cobertura del dosel.

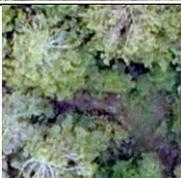
| % de cobertura | Clave | Ejemplo   |
|----------------|-------|---|
| 0 – 10         | 1     |    |
| 0 – 10         | 1     |    |
| 10 – 40        | 2     |    |
| 10 – 40        | 2     |   |
| 40 – 70        | 3     |  |
| 40 – 70        | 3     |  |
| 70 – 100       | 4     |  |
| 70 – 100       | 4     |  |



Figura 19 y 20. Material derribado y levantamiento de información espacial en Sierra Chincua, mayo/2017.



Figura 21 y 22. Material derribado en el Ejido Chincua, enero/2019.



Figura 23 y 24. Levantamiento de información espacial y material fracturado en el Ejido San Jerónimo Pilitas, febrero/2019.



Figura 25. Material derribado en Sierra Chincua, mayo/2017.



Figura 26. Árbol desenraizado en el Ejido Chincua, enero/2019.



Figura 27 y 28. Material derribado y fracturado en el Ejido Chincua, enero/2019.