



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL**

**Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo  
Integral Regional Unidad-Oaxaca**

---

---

**Maestría en Ciencias en Conservación y  
Aprovechamiento de Recursos Naturales  
(Biodiversidad del Neotrópico)**

**"Identificación de zonas de atropellamiento de  
anfibios y reptiles nocturnos y su relación con  
variables ambientales en La Esperanza, Oaxaca."**

**TESIS:**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS**

**PRESENTA:**

**BIOL. TERESO LÓPEZ GARCÍA**

**DIRECTORA:**

**DRA. EDNA LETICIA GONZÁLEZ BERNAL**

**Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México**



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

## ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS Y DESIGNACIÓN DE DIRECTOR DE TESIS

Ciudad de México, 30 de mayo del 2022

El Colegio de Profesores de Posgrado de **CIIDIR UNIDAD OAXACA** en su Sesión  
(Unidad Académica)

ordinaria No. 03 celebrada el día 09 del mes marzo de 2022 conoció la solicitud presentada por el alumno:

Apellido Paterno:	López	Apellido Materno:	García	Nombre (s):	Tereso
-------------------	-------	-------------------	--------	-------------	--------

Número de registro: A 2 0 0 1 4 5

del Programa Académico de Posgrado: Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales

Referente al registro de su tema de tesis; acordando lo siguiente:

1.- Se designa al aspirante el tema de tesis titulado:

"Identificación de zonas de atropellamiento de anfibios y reptiles nocturnos y su relación con variables ambientales en La Esperanza, Oaxaca."

Objetivo general del trabajo de tesis:

Identificar y cuantificar a las especies de anfibios y reptiles nocturnos afectadas por el tráfico vehicular dentro de un BMM en la Sierra Norte de Oaxaca durante las temporadas de lluvias, secas y transiciones e identificar las variables ambientales y antropogénicas asociadas a las zonas de mayor atropellamiento.

2.- Se designa como Directora de Tesis a la profesora:

Directora: Dra. Edna Leticia González Bernal 2° Director: No aplica:

3.- El Trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesis será elaborado por el alumno en:

La Comunidad de La Esperanza, Santiago Comaltepec, Oaxaca y dentro del laboratorio de Ecología de Anfibios en el Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca.

que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.

4.- El interesado deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente, hasta la aprobación de la versión completa de la tesis por parte de la Comisión Revisora correspondiente.

Directora de Tesis

Edna Leticia González Bernal

Aspirante

López García Tereso

2° Director de Tesis (en su caso)

Presidente del Colegio

Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
CENTRO INTERDISCIPLINARIO  
DE INVESTIGACIÓN PARA EL  
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL  
UNIDAD OAXACA



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

## SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-14  
REP 2017

### ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de  siendo las  horas del día  del mes de  del  se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de profesores de posgrado del:  para examinar la tesis titulada:

**Identificación de zonas de atropellamiento de anfibios y reptiles nocturnos y su relación con variables ambientales en La Esperanza, Oaxaca.**

del alumno:

Apellido Paterno:	LÓPEZ	Apellido Materno:	GARCÍA	Nombre (s):	TERESO
-------------------	-------	-------------------	--------	-------------	--------

Número de registro:

Aspirante del Programa Académico de Posgrado:

Aprovechamiento de Recursos Naturales.

Una vez que se realizó un análisis de similitud de texto, utilizando el software antiplagio, se encontró que el trabajo de tesis tiene 2% de similitud. **Se adjunta reporte de software utilizado.**

Después que esta Comisión revisó exhaustivamente el contenido, estructura, intención y ubicación de los textos de la tesis identificados como coincidentes con otros documentos, concluyó que en el presente trabajo **SI**  **NO**  **SE CONSTITUYE UN POSIBLE PLAGIO.**

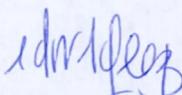
#### JUSTIFICACIÓN DE LA CONCLUSIÓN:

Las coincidencias corresponden a palabras o frases comúnmente utilizadas en la línea de investigación en la que el trabajo se enmarca

**\*\*Es responsabilidad del alumno como autor de la tesis la verificación antiplagio, y del Director o Directores de tesis el análisis del % de similitud para establecer el riesgo o la existencia de un posible plagio.**

Finalmente, y posterior a la lectura, revisión individual, así como el análisis e intercambio de opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR**  **SUSPENDER**  **NO APROBAR**  la tesis por **UNANIMIDAD**  o **MAYORÍA**  en virtud de los motivos siguientes:

Cumple con los requisitos correspondientes

  
Dra. Edna Leticia González Bernal

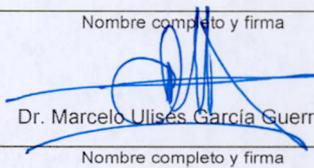
Director de Tesis  
Nombre completo y firma

  
Dr. Miguel Ángel Briones Salas  
Nombre completo y firma

#### COMISIÓN REVISORA DE TESIS

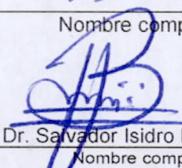
M.C. Graciela Eugenia González Pérez

Nombre completo y firma

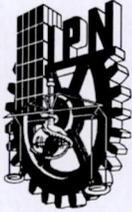
  
Dr. Marcelo Ulises García Guerrero  
Nombre completo y firma

M.C. Mario Cesar Lavariega Nolasco

Nombre completo y firma

  
Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez  
Nombre completo y firma

**ESTADOS UNIDOS MEXICANOS**  
**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**COMITÉ INTERDISCIPLINARIO**  
**DE INVESTIGACIÓN PARA EL**  
**DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL**  
**UNIDAD OAXACA**



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

## SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

### CARTA DE AUTORIZACIÓN DE USO DE OBRA PARA DIFUSIÓN

En la Ciudad de México el día 20 del mes de junio del año 2022, el que suscribe **López García Tereso** alumno del programa de **Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales** con número de registro **A200145**, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de tesis bajo la dirección de la **Dra. Edna Leticia González Bernal** y cede los derechos del trabajo intitulado "**Identificación de zonas de atropellamiento de anfibios y reptiles nocturnos y su relación con variables ambientales en La Esperanza, Oaxaca.**", al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expresado del autor y/o directora. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones de correo **teresolg7@gmail.com** y **tlopezg2000@alumno.ipn.mx**. Si el permiso se otorga, al usuario deberá dar agradecimiento correspondiente y citar la fuente de este.

López García Tereso



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
CENTRO INTERDISCIPLINARIO  
DE INVESTIGACIÓN PARA EL  
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL  
UNIDAD OAXACA

## ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN .....	1
ABSTRACT .....	2
INTRODUCCIÓN .....	3
I. MÉTODOS .....	6
I.1 Área de estudio .....	6
I.2 Monitoreo .....	7
I.3 Parámetros ambientales .....	9
I.4 Morfología.....	9
II. ANÁLISIS DE DATOS .....	9
II.1 Determinación de zonas de riesgo.....	9
II.2 Relación de variables ambientales y antropogénicas con atropellamientos.....	10
II.4 Modelos lineales generalizados (GLM) .....	11
III. RESULTADOS .....	12
III.1 Registros .....	12
III.2 Relación de atropellamientos con las temporadas .....	14
III.3 Zonas críticas atropellamiento de anfibios y reptiles.....	16
III.4 Variables ambientales asociados a las muertes por atropellamiento .....	19
III.5 Modelos Lineales Generalizados (GLM).....	23
IV. DISCUSIÓN .....	29
V. CONCLUSIÓN .....	35
VI. REFERENCIAS .....	36

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Área de estudio.....	7
<b>Figura 2.</b> Precipitación mensual 2020-2021. ....	8
<b>Figura 3.</b> Porcentaje de registros de anfibios atropellados en las tres temporadas de monitoreo.	15
<b>Figura 4.</b> Porcentaje de registros de reptiles atropellados en las tres temporadas de monitoreo.	16
<b>Figura 5.</b> Zonas críticas de atropellamientos para anfibios dentro de los cinco transectos. ....	17
<b>Figura 6.</b> Zonas críticas de atropellamientos dentro de los cinco transectos. ....	18
<b>Figura 7.</b> Diferencias entre la salud de vegetación de los cinco transectos en el área de estudio.....	19
<b>Figura 8.</b> Diferencias en el índice de humedad en los cinco transectos en el área de estudio.....	20
<b>Figura 9.</b> Diferencias en el contenido de agua en la vegetación entre transectos.....	20
<b>Figura 10.</b> Diferencias en el número de cuerpos de agua presentes en los transectos.....	21
<b>Figura 11.</b> Temperaturas de la superficie entre transectos.....	22
<b>Figura 12.</b> Porcentaje de la cobertura de dosel arbóreo en los cinco transectos.....	22
<b>Figura 13.</b> Predicción del número de atropellamientos de anfibios según el porcentaje de dosel arbóreo. ....	24
<b>Figura 14.</b> Predicción del número de atropellamientos de anfibios según la variación en la presión barométrica. ....	24
<b>Figura 15.</b> Predicción del número de atropellamientos de anfibios según la pendiente del área.	25
<b>Figura 16.</b> Predicción del número de atropellamientos de anfibios según la distancia a zonas antropogénicas. ....	26
<b>Figura 17.</b> Predicción del número de atropellamientos de anfibios de acuerdo con la pendiente en el talud derecho de la cuneta. ....	26
<b>Figura 18.</b> Predicción del número de atropellamientos de anfibios según el turno de monitoreo.....	26
<b>Figura 19.</b> Predicción del número de atropellamientos de reptiles según los cambios en la presión barométrica. ....	28
<b>Figura 20.</b> Predicción del número de atropellamientos de reptiles según la distancia a cuerpos de agua... ..	28
<b>Figura 21.</b> Tendencia del número de atropellamientos de reptiles según la pendiente del talud izquierdo de la cuneta. ....	29

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Especies registradas durante el monitoreo sobre carreteras y rango altitudinal de ocurrencia.....	13
<b>Tabla 2.</b> Registro de anfibios y reptiles atropellados por transecto durante los seis monitoreos.	16
<b>Tabla 3.</b> Variables ambientales y antropogénicas y su nivel de asociación en el atropellamiento de anfibios.....	23
<b>Tabla 4.</b> Mejor modelo del GLM para la predicción de atropellamiento de anfibios de acuerdo con las variables ambientales.....	24
<b>Tabla 5.</b> Mejor modelo del GLM para la predicción de atropellamiento de anfibios de acuerdo con las variables antropogénicas. ....	25
<b>Tabla 6.</b> Variables ambientales y antropogénicas, y su nivel de asociación en el atropellamiento de reptiles.....	27
<b>Tabla 7.</b> Mejor modelo del GLM para la predicción de atropellamiento de reptiles de acuerdo con las variables ambientales.....	27
<b>Tabla 8.</b> Mejor modelo del GLM para la predicción de atropellamiento de reptiles de acuerdo con las variables antropogénicas .....	29

## **AGRADECIMIENTOS**

A la comunidad de La Esperanza, Santiago Comaltepec por la hospitalidad y el apoyo en el desarrollo de este trabajo y en reconocimiento por su esfuerzo en la conservación de la biodiversidad de su territorio.

A mi directora de tesis: Dra. Edna Leticia González Bernal.

A los miembros del comité revisor de este trabajo.

A mis amigos y compañeros del laboratorio de Ecología para la Conservación de Anfibios por el apoyo en el desarrollo de esta investigación.

A toda mi familia por su apoyo incondicional, en especial a mi pareja Rosario Hernández.

## RESUMEN

Los anfibios y reptiles han sido catalogados como los vertebrados bajo mayor presión, debido principalmente a la introducción de especies invasoras, enfermedades emergentes, cambio climático, pérdida y fragmentación de hábitat. Una de las razones de la pérdida y fragmentación del hábitat es la creación de carreteras, las cuales limitan la dispersión de las especies debido a la generación de ruido y provocan disminución de poblaciones debido al atropellamiento lo que puede poner en riesgo la estabilidad poblacional e incluso terminar en extinciones locales. Evaluamos el efecto que tiene el tráfico vehicular sobre los anfibios y reptiles nocturnos a través del monitoreo de cinco transectos en una carretera dentro de un bosque mesófilo de montaña en la Sierra Norte de Oaxaca, México. Los monitoreos se realizaron en temporada de lluvias, temporada de secas y las transiciones. Registramos un total de 189 organismos de los cuales 158 corresponden a organismos atropellados; el 67.1 % (106 registros) corresponde a anfibios y el 32.9% (52 registros) a reptiles. Los anfibios mayormente atropellados fueron *Charadrahyla esperancensis* y *Ptychohyla zophodes* (ambos con 30 registros), mientras que el reptil con más conteo de cadáveres fue *Geophis duellmani* (34 registros). En la temporada de lluvias se registró el mayor número de registros de anfibios y reptiles con 51 y 26 registros, respectivamente. Se identificaron a los transectos 1 y 2 como las zonas críticas de atropellamiento para anfibios, mientras que para reptiles todos los transectos resultaron importantes. Las variables ambientales asociadas al atropellamiento de anfibios fueron: el dosel arbóreo, presión barométrica y la pendiente del área, mientras que las antropogénicas fueron: las distancias a áreas antropizadas, pendiente en el talud derecho de la cuneta y la hora. Para el caso de los reptiles, las variables ambientales más importantes fueron: la presión barométrica y distancia a cuerpos de agua. No se encontraron variables antropogénicas asociadas a las zonas críticas de atropellamientos. Muchas especies de anfibios y reptiles nocturnos están siendo atropelladas por el tráfico vehicular dentro del BMM; nuestro estudio proporciona información sobre las especies más afectadas y las características de las zonas de mayor impacto dentro de estos ecosistemas de gran biodiversidad. Conviene realizar monitoreos periódicamente que permitan conocer el estatus poblacional a nivel especie y crear pasos de fauna adecuados que aseguren la supervivencia de la vida silvestre.

**Palabras clave:** anfibios, carreteras, atropellos, zonas críticas de fatalidad, temporada, bosque mesófilo de montaña.

## ABSTRACT

Amphibians and reptiles have been listed as the vertebrates under greatest pressure, mainly due to the introduction of invasive species, emerging diseases, climate change and habitat loss. One of the reasons for habitat loss is the creation of roads, which limit the dispersal of species through noise generation and cause population declines due to running over, which can put population stability at risk and even lead to local extinctions. We evaluated the effect of vehicular traffic on nocturnal amphibians and reptiles by monitoring five road transects within a montane cloud forest in the Sierra Norte of Oaxaca, Mexico. The monitoring was carried out during the rainy season, the dry season, and the transitions between seasons. We registered a total of 189 organisms, of which 158 correspond to run over organisms; 67.1% (106 records) correspond to amphibians and 32.9% (52 records) to reptiles. The amphibians most frequently run over were *Charadrahyla esperancensis* and *Ptychohyla zophodes* (both with 30 records), while the reptile with the highest body count was *Geophis duellmani* (34 records). In the rainy season, the highest number of records of amphibians and reptiles was recorded with 51 and 26 records, respectively. Transects 1 and 2 were identified as the critical roadkill zones for amphibians, while all transects were important for reptiles. The environmental variables associated with the roadkill of amphibians were the tree canopy, barometric pressure and the slope of the area, while the anthropogenic ones were the distances to anthropized areas, slope on the right slope of the ditch and the time. In the case of reptiles, the most important environmental variables were barometric pressure and distance to waterbodies. No anthropogenic variables were associated with critical run-over zones of reptiles. Periodic monitoring is necessary to help identify the impacts it may have on populations, especially of species in decline. Many species of nocturnal amphibians and reptiles are being roadkill within the BMM; Our study provides information on the most affected species and the characteristics of the areas of greatest impact within these highly biodiverse ecosystems. Periodic monitoring should be carried out to allow knowing the population status at the species level and create adequate fauna crossings that ensure the survival of wildlife.

**Keywords:** amphibians, highways, roadkill, fatality critical zones, seasonality, montane cloud forest.

## INTRODUCCIÓN

Uno de los ecosistemas más relevantes por la diversidad de fauna y endemismos que posee son los bosques mesófilos de montaña (BMM) (Gual-Díaz y Rendón-Correa 2014; Tobar-Suárez *et al.* 2021). Sin embargo, son también uno de los ecosistemas más amenazados a nivel mundial debido a factores antropogénicos (Aldrich *et al.*, 2000; Muñoz-Villers y López-Blanco 2008; Toledo-Aceves *et al.*, 2011; Martín *et al.*, 2021). En México, la distribución del BMM cubre menos del 0.5% del territorio nacional (INEGI, 2021). Se encuentra en fragmentos a lo largo de las Sierras principalmente en regiones de relieve accidentado y laderas de pendiente pronunciada, en cañadas protegidas de los vientos y fuerte insolación (INEGI, 2015). El fragmento de BMM está en las montañas del norte de Oaxaca y es amenazado por factores como el cambio climático global, la deforestación para la creación de potreros y la fragmentación debido a la agricultura afectando su equilibrio ecológico (Gual-Díaz y Rendon-Correa, 2017).

Distintas actividades humanas han disminuido la calidad y cantidad de espacios naturales a través de la fragmentación del paisaje interrumpiendo la conectividad de ecosistemas y provocando el aislamiento de poblaciones de fauna silvestre (Saunders *et al.*, 1991; Kindlmann y Burel, 2008). Entre estas actividades se encuentran la tala, el cambio de uso de suelo y la apertura de vías de comunicación como carreteras, aspecto que ha sido poco estudiado en nuestro país (Glista *et al.*, 2009; Benítez *et al.*, 2021; Nahuat-Cervera *et al.*, 2021).

En el 2013 las carreteras superaban los 64 millones de kilómetros lineales en todo el mundo (Central Intelligence Agency, 2020) y se estima que para el 2050 se construirán 25 millones de kilómetros más (Dulac, 2013). En 2017 México estaba entre los primeros 20 países a nivel mundial con más carreteras, con un total de 398,148 km de longitud construidos, de los cuales el 43.9% correspondía a carreteras pavimentadas y el 56.1% a carreteras no pavimentadas (Central Intelligence Agency, 2020). Estas cifras son preocupantes si consideramos todos los impactos que conlleva la creación y uso de carreteras sobre la vida silvestre (Beebee, 2013) como: deforestación, cambio en la hidrología natural, explotación de bancos de materiales pétreos, erosión de suelos, contaminación, pérdida y fragmentación de hábitats, así como el atropellamiento de vida silvestre (Cushman, 2005; Benítez y Escalona-Segura, 2021).

El punto de intersección de carreteras con los bosques es catalogado como un área ecológicamente peligrosa debido a las altas tasas de atropellamiento de vertebrados (Glista *et al.*, 2009; Ayob *et al.*, 2020). Los principales impactos de las carreteras, una vez finalizada su

construcción, es la interferencia con el movimiento y dispersión de organismos y disminución en los tamaños de las poblaciones, aspectos fundamentales en la demografía de las especies ya que determinan su colonización y persistencia en hábitats fragmentados (Lowe, 2009).

En América Latina, los estudios del efecto que tienen las carreteras sobre los vertebrados aún son escasos; de los 197 estudios de impacto de carreteras en esta región, el 11% se han hecho en América Central y solo 5% se realizaron en México. La información disponible del impacto de carreteras sobre vida silvestre en el Neotrópico se ha considerado en fase temprana y con muy poca información comparada con la existente en la región Holártica (González-Gallina y Benítez-Badillo, 2013). Considerando que las carreteras tienen un impacto negativo sobre los anfibios y reptiles (Andrews et al., 2008), que esta situación podría derivar en extinciones locales (Beebee, 2013), y la falta de estudios del impacto de carreteras sobre la vida silvestre en México, es necesario aumentar estudios científicos, sobre todo en zonas de alta diversidad de herpetofauna que presentan un alto porcentaje de especies en categorías de riesgo como es la Sierra Norte de Oaxaca. Conocer qué especies son las más afectadas y las variables asociadas a los atropellamientos, permitirá entender de mejor manera los factores que ponen en riesgo a especies nativas y dirigir esfuerzos de mitigación y prevención focalizados.

Todos los organismos se desplazan motivados principalmente por la búsqueda de alimento, pareja y condiciones ambientales favorables; sin embargo, la capacidad de dispersión de vertebrados pequeños como algunos anfibios y reptiles es un factor que influye en el riesgo de atropellamiento considerando que a mayor dispersión aumenta la probabilidad de ser atropellado (Selvan et al., 2012; Seo et al., 2015). Por ejemplo, el atropellamiento durante las migraciones de anfibios juveniles desde hábitats acuáticos hacia hábitats terrestres tiene un impacto desproporcionado en la dinámica de poblaciones (Mazerolle et al., 2005; Wells, 2007; Petrovan y Schmidt, 2019) ya que se impide la aportación genética de inmigrantes y disminuye el tamaño poblacional (Lande, 1988). También, factores como el aumento del tráfico vehicular afecta a organismos de mayor vagilidad en mayor proporción (Carr y Fahrig 2001; Mazerolle, 2004). Las muertes de individuos de especies con bajas abundancias y en estado crítico podrían ocasionar extinciones locales (Beebee, 2013).

La respuesta de los anfibios y reptiles al tránsito vehicular es diferente entre especies, mientras que los organismos de algunas especies permanecen inmóviles ante la aproximación de un vehículo debido al ruido del motor y/o a la luz de los faros son atropellados en mayor número,

mientras que otras que suelen aumentar su movimiento corren menos riesgo (Mazerolle et al., 2005; Andrews y Gibbons 2005). Para otras especies el ruido generado por el tráfico vehicular tiene un efecto disuasivo impidiendo que crucen, limitándolas a las orillas de carretera (Benítez et al., 2021).

Se sabe que los anfibios y reptiles son los vertebrados más afectados por actividades humanas (Beebee and Griffiths, 2005; Ficelota, 2015), entre ellos la muerte por atropellamiento (Glista et al. 2008; Heigl et al., 2017; Náhuat-Cervera et al., 2021). Estos grupos tienen las tasas más altas de mortalidad por atropellamientos seguido de los mamíferos y aves (Pinto et al., 2020), en ocasiones representando hasta el 90% de los vertebrados muertos por atropellamiento (Glista et al., 2008). Atropellamientos masivos de anfibios y reptiles están asociados a la temporada de lluvias; por una parte, esta temporada se relaciona con la migración y actividad reproductiva de los anfibios, mientras que los reptiles aumentan su actividad en busca de alimento debido a que las lluvias estimulan la aparición de insectos, aves y pequeños vertebrados. En ambos casos, cuando sus hábitats son atravesados por carreteras resulta en una alta mortalidad (Morelle et al., 2013; Seo et al., 2015; Canal, et al., 2018; Hastings et al., 2019).

Se ha observado que las muertes por atropellamiento no ocurren al azar ni de manera homogénea (Karanasios, et al., 2021), es decir hay un factores espaciales que influyen (Clevenger, et al., 2003). Existe un patrón de distribución de atropellamientos de acuerdo con la preferencia de microhábitats que se forman lo largo de las carreteras; por ejemplo, la abundancia de ambos grupos está influenciada por la disponibilidad de agua en las orillas de las carreteras (Main y Allen, 2002) y por áreas cercanas a vegetación natural (Medrano-Vizcaíno y Espinosa, 2021). También se han registrado más individuos atropellados en zonas de humedales y zonas de alto porcentaje de bosque natural en comparación con zonas agrícolas o áreas con parches de bosque mixto (Glista et al., 2009; Seo et al., 2015; Hastings et al., 2019). Los espacios ocupados por el hombre también pueden influir sobre las muertes por atropellamiento, ya que se ha encontrado que mientras más cerca se encuentre la mancha urbana, mayor es el número de organismos atropellados (Sousa-Guedes et al., 2021).

El objetivo de este estudio es evaluar el impacto de las carreteras sobre los anfibios y reptiles nocturnos dentro de un BMM en la Sierra Norte de Oaxaca, en particular determinaremos el número de atropellamientos y evaluaremos si existe una relación con las características del grupo, así como las condiciones ambientales y características circundantes a la carretera. Con base a esto

se plantearon tres hipótesis 1) Existen zonas donde la frecuencia de atropellamientos es mayor, 2) Estas zonas de atropellamiento de anfibios y reptiles nocturnos están asociadas a características y recursos específicos disponibles en sitios aledaños a la carretera, y 3) Los sitios específicos por grupo y especies estarán influenciados por las características marcadas por la temporada de lluvias, secas y transiciones.

## I. MÉTODOS

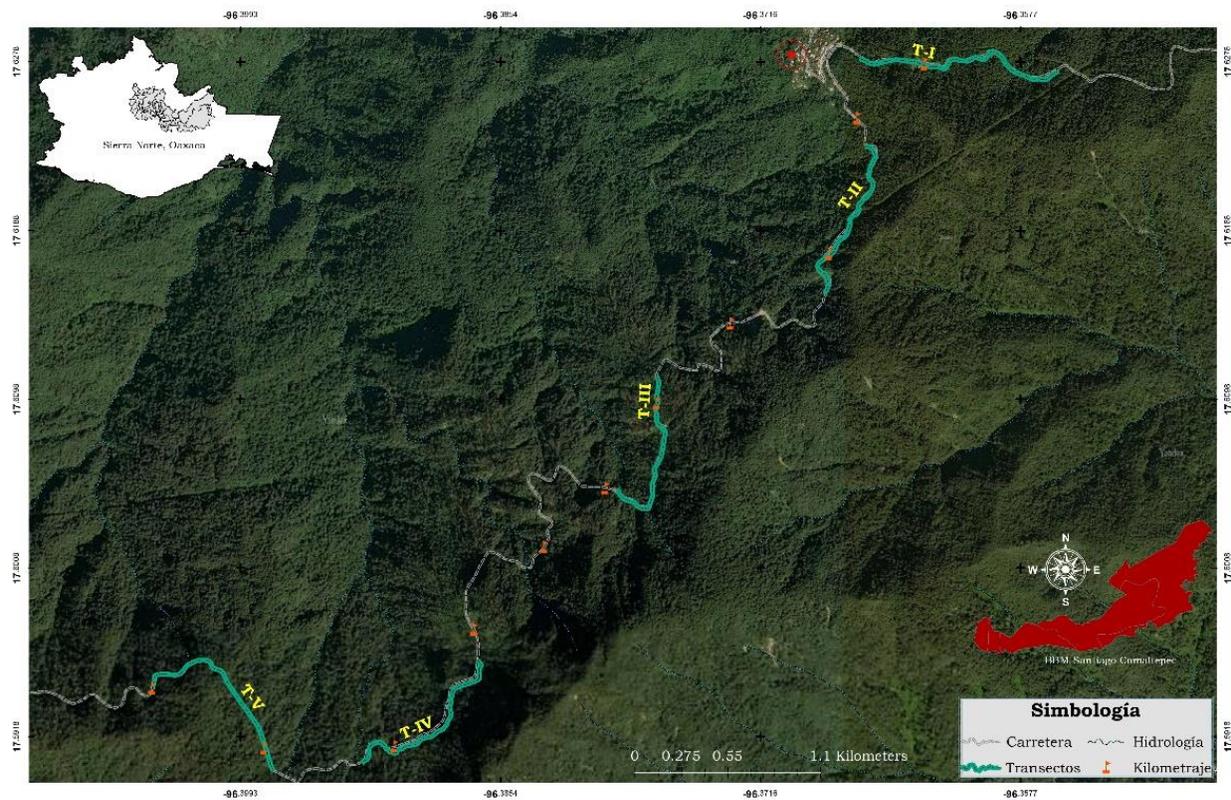
### I.1 Área de estudio

La agencia de policía La Esperanza (17° 37' 39.72" N y 96° 22' 6.28" O), perteneciente al municipio de Santiago Comaltepec, es una comunidad que se encuentra localizada en la subprovincia fisiográfica de la Sierra Madre de Oaxaca (Ortiz-Pérez, 2004). Se ubica a una altitud de 1,600 m.s.n.m., presenta una temperatura media anual de 9.03 °C y una precipitación anual de 6,000 mm, siendo de los más húmedos en México (Gual-Díaz y Rendon-Correa, 2017). La temporada de lluvias va de junio a octubre mientras que las secas van de noviembre a mayo, aunque la zona se caracteriza por presentar lluvias ocasionales durante todo el año (CONAGUA, 2010). El municipio conserva de manera voluntaria 4,420.85 hectáreas de BMM mediante el esquema de "áreas destinadas voluntariamente a la conservación" (ADVCA) (Santiago Comaltepec, 2011). Además, tiene 2565.48 hectáreas dentro del programa de pago por servicios ambientales, con el cual invierte el recurso en obras de conservación, difusión, mantenimiento de senderos, colocación de letreros de concientización y vigilancia al interior del predio comunal (CONAFOR, 2018). En esta área está prohibido llevar a cabo actividades de agricultura, ganadería, construcción de viviendas, tala de árboles, cacería y extracción de flora o fauna (López-Hernández, E., comunicación personal, 29 de octubre de 2020).

La Esperanza está inmersa dentro de una zona de bosque mesófilo de montaña con una gran diversidad y endemismos de anfibios (Simón-Salvador *et al.* 2021; Cruz-Elizalde *et al.*, 2022). El territorio de La Esperanza es atravesado por la carretera federal 175, construida en los años 60's. Dicha carretera es de dos carriles, mide aproximadamente 6 m de ancho y tiene un tránsito diario promedio de 580 unidades. Esta vía es la principal ruta de comunicación entre la capital del estado y el municipio de San Juan Bautista Tuxtepec (SCT, 2020). En este territorio, su trayecto atraviesa el BMM, así como diversos escurrimientos y ríos perennes, veredas y brechas realizadas por la Comisión Federal de Electricidad, vegetación secundaria, áreas de extracción de leña, cañadas, escurrimientos y áreas urbanizadas.

## I.2 Monitoreo

Se trazaron cinco transectos en franja a lo largo de la zona de BMM en un tramo carretero entre los kilómetros 78-89, separados entre sí por un 1 km aproximadamente. Para su delimitación se consideró la presencia de arroyos y cañadas, límite territorial del municipio, que la vegetación fuera BMM y tramos seguros para hacer los recorridos a pie. El primer transecto (TI) tiene una longitud de 1,295 m, el segundo (TII) de 1,083 m, el tercero (TIII) de 1,052 m, el cuarto (TIV) de 1,168 m y el quinto (TV) de 1,179 metros, que en total suman 5.777 Km (Figura 1).

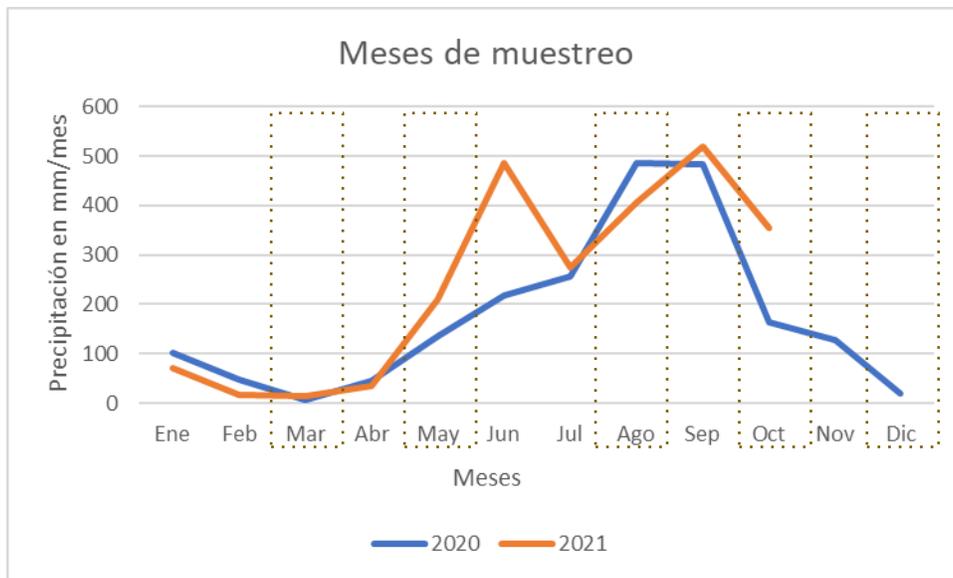


**Figura 1.** Área de estudio. Muestra cinco transectos a lo largo de la carretera 175 dentro del bosque mesófilo.

Empleando la técnica de encuentro visuales (Heyer et al., 1994) se buscaron tanto individuos vivos como atropellados a lo largo de cada transecto incluyendo la zona asfaltada y 2 m a cada orilla de la carretera, esto con el fin de ubicar individuos con intención potencial de cruzar y, por tanto, en riesgo de ser atropellados. Todos los transectos fueron recorridos a pie por dos personas en dos horarios, el primero iniciando a las 21:00 hrs y el segundo a partir de las 05:00

hrs. El primer horario fue elegido conforme a la actividad de los anfibios y reptiles nocturnos, mientras que el segundo se estableció para registrar organismos atropellados entre las 2 y 5 a.m., esto debido a que se estima que el 60% de los cadáveres de anfibios pequeños desaparecen de la carretera en las siguientes 24 horas (Brzezinski et al., 2012). El orden de los recorridos fue aleatorio. De forma paralela, durante los recorridos se contabilizó el número de vehículos con el fin de obtener el tráfico vehicular.

Para conocer el efecto de la temporada sobre la ocurrencia de muertes en anfibios y reptiles nocturnos, los monitoreos abarcaron la temporada de secas, temporada de lluvias y transiciones entre temporadas. De acuerdo con la precipitación registrada para el sitio de estudio, la temporada de lluvias (precipitación > 300 mm/mes) abarca los meses de junio, julio, agosto, septiembre y octubre, mientras que la temporada de secas (precipitación <300 mm/mes) los meses de enero, febrero, marzo, abril, mayo, noviembre y diciembre (Prediction Of Worldwide Energy Resources, 2022), aunque estas pueden variar anualmente. Los muestreos quedaron definidos como: temporada de secas diciembre y marzo; temporada de lluvias agosto y octubre (2021); y transiciones entre temporadas octubre (2020) y mayo (2021) (Figura 2).



**Figura 2.** Precipitación mensual 2020-2021.  
(Prediction Of Worldwide Energy Resources, 2021)

### **I.3 Parámetros ambientales**

Cada vez que se encontró un organismo atropellado se registró la fecha y hora de encuentro, así como la velocidad de viento, temperatura ambiental, enfriamiento del viento, humedad relativa, índice de calor, punto de rocío y presión barométrica con una estación climatológica portátil (Kestrel 3500 Pocket Weather Meters). La geolocalización del sitio y la altitud se registró con un sistema de posicionamiento global (GPSmap 64sx). Además, se registró la presencia/ausencia y número de cuerpos de agua (ríos o arroyos); se midió la pendiente de dos taludes que forman la cuneta adyacente en la parte alta de la carretera y que funcionan como canales de desagüe con un clinómetro; se midió la velocidad de los escurrimientos en cunetas con un flujómetro; y el porcentaje del dosel arbóreo se midió a 5 m partiendo de la carretera hacia dentro del bosque con ayuda de un densiómetro esférico cóncavo.

### **II.4 Morfología**

Cuando se encontraron organismos vivos se tomaron datos de peso corporal con una balanza de resorte (pesola), se midió la Longitud Hocico-Cloaca (LHC) con un Vernier, y la temperatura corporal (TC), temperatura del sustrato (TS) y temperatura del suelo con un termómetro infrarrojo (Fluke 62 Max). Para los individuos atropellados, cuando fue posible, se midieron los rasgos morfométricos de peso y longitud. Los cadáveres se colectaron en frascos de vidrio con alcohol al 70% para su posterior identificación.

## **II. ANÁLISIS DE DATOS**

Se realizó un listado de las especies registradas a lo largo del estudio y por temporadas. El estatus de conservación de cada especie se obtuvo de la norma oficial mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010 y de la lista roja de especies amenazadas de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, 2019).

### **II.1 Determinación de zonas de riesgo**

Para determinar las zonas con mayor número de atropellamientos, se realizó un análisis de densidad de Kernel bajo el método de clasificación de rupturas naturales de Jenks a través del software ArcMap 9.3, (Software by ESRI). Este método toma en cuenta el número de organismos atropellados de anfibios y reptiles donde los valores similares (cadáveres cercanos) se agrupan para maximizar las diferencias entre zonas de atropellamiento de tal manera que quedan divididos estableciendo donde hay diferencias considerables entre el conjunto de datos (Dornas et al., 2019).

Se estableció un radio de búsqueda de 6 m (tamaño del píxel), considerando el ancho de la carretera. Con base en la densidad de individuos muertos en las carreteras, las zonas críticas de fatalidad se clasificaron en 5 categorías de importancia según el porcentaje de cadáveres por área: muy alto, alto, medio, bajo y muy bajo, entendiendo por zonas críticas de atropellamiento las categorías muy alto y alto.

## II.2 Relación de variables ambientales y antropogénicas con atropellamientos

Con el fin de identificar la relación de variables ambientales con los organismos atropellados, a través del Servicio Geológico de EE. UU. (Earth Explorer) se obtuvieron imágenes satelitales Landsat 8 OLI/TIRS C1 Level 1 del área de estudio (resolución espacial 30 x 30 m). La selección de éstas se hizo con base en los meses de monitoreo y considerando imágenes con menos del 30% de nubosidad. Utilizando la calculadora Ráster del programa Quantum GIS Software versión 3.20.3 (Quantum GIS Development Team 2020) se calcularon los siguientes índices: índice diferencial de vegetación normalizada (NDVI), índice diferencial de agua normalizada (NDWI) e índice diferencial de humedad normalizada (NDMI), así como la temperatura de la superficie terrestre (LST).

Cada transecto se dividió en 4 partes iguales obteniendo un total de 20 segmentos de aproximadamente 288.8 m cada uno. Dentro de cada segmento se establecieron dos cuadrantes de 100 x 100 m para extraer una muestra de 9 puntos por cuadrante con información de los diferentes índices (considerando que cada píxel tiene un área de 30 x 30 m y que representa un valor para cada índice). En total se obtuvieron 2160 datos/mes de monitoreo/índice.

- **NDVI: Índice Diferencial de Vegetación Normalizada** (Kriegler et al., 1969; Pettorelli et al, 2005); identifica la salud de la vegetación (áreas con o sin vegetación). Fórmula  $(B5 - B4) / (B5 + B4)$ .

Los valores van de -1 a 1; donde -1= vegetación con mala salud o ausencia de vegetación, 0= Salud de vegetación baja y 1= Salud de vegetación buena, mucha actividad fotosintética, bosque verdoso o vigoroso.

- **NDWI Índice Diferencial de Agua Normalizada**

Método de Gao (1996)

Identifica contenido de agua en la cubierta vegetal. Fórmula  $(B5 - B6) / (B5 + B6)$

Los valores van de -1 a 1; donde -1= estrés hídrico o ausencia de agua en cubierta vegetal; se puede asumir que no hay vegetación, 0= indica un bajo contenido de agua en la vegetación y 1= alto contenido de agua en la cubierta vegetal.

- NDWI: Índice Diferencial de Agua Normalizada

Método de McFeeters, 1996

Identifica cuerpos de agua a nivel superficie. Fórmula  $(B3-B5) / (B3+B5)$ .

Los valores van de -1 a 1; donde -1= ausencia de cuerpos de agua y 1= elevado número de cuerpos de agua.

- NDMI: Índice Diferencial de Humedad Normalizada (Taloor et al., 2021); permite conocer los niveles de humedad foliar de las plantas. Fórmula  $(B5-B6) / (B5+B6)$ .

Los valores van de -1 a 1; donde -1= baja humedad foliar, 0= humedad foliar media y 1= contenido de humedad foliar alta.

- LST: Temperatura de la Superficie Terrestre (Parastatidis et al, 2017). Para este caso se realizó la corrección de la capa B10 a grados Celsius.

Además, se estimó el dosel arbóreo cada 25 m a lo largo de los cinco transectos por la misma persona. Las variables se compararon mediante análisis de varianza (ANOVA), prueba de Wilcoxon y Kruskal-Wallis, para conocer la varianza entre transectos y pruebas post hoc Tukey-Kramer para identificar transectos homogéneos o diferentes entre sí empleando el programa JMP Pro-14 y GraphPad Prism 9.

Con el programa ArcMap se crearon polígonos de áreas habitacionales, cabañas, comedores, brechas de cables de electricidad, terrenos agrícolas, potreros y se agruparon en una sola capa identificada como áreas antropizadas; además se realizó la geolocalización de los cuerpos de agua. Mediante un análisis de distancias euclidianas (metros) se obtuvieron capas ráster de 1 m por píxel para identificar posibles asociaciones entre el atropellamiento de organismos y las distancias que había hacia áreas antropizadas y cuerpos de agua más cercanos

#### **II.4 Modelos lineales generalizados (GLM)**

Las variables ambientales para el análisis fueron: la temperatura del ambiente obtenida a partir de la estación climatológica portátil, temperatura del sustrato, temperatura del asfalto, temperatura del suelo, velocidad del viento, enfriamiento del viento, humedad relativa, índice de calor, punto de rocío, temperatura de cubeta mojada, presión barométrica, altitud, pendiente del área, distancia a cuerpos de agua, dosel arbóreo, temporada e índices (NDVI, NDWI y NDMI). Las variables

antropogénicas fueron: distancias a zonas antropizadas, pendiente en los taludes de la cuneta y horario de monitoreo (turno 1 y turno 2).

Los datos se analizaron por clases (anfibios y reptiles). Se obtuvieron medidas representativas para cada conjunto de datos empleando las medias en las variables continuas y la moda en las variables categóricas, para posteriormente realizar una imputación de datos (Welsh, 1987; Kim, 1992). Realizamos análisis exploratorios, descriptivos y análisis de correlación de Spearman, así como la construcción de modelos lineales simples para la exploración de los datos. Con base en esto, se concluyó que el mejor método para modelar la interacción de las variables y número de atropellamientos era mediante GLM para una distribución de Poisson con función de enlace logarítmica. Para depurar las variables para el modelo se utilizó mediante la función `findCorrelation` del paquete `Caret`, el algoritmo medias de los valores absolutos de correlación de cada variable dejando solo las variables que aportan más información al conjunto de datos y evitando la multicolinealidad en los modelos.

Se construyeron todas las combinaciones posibles de las variables con la función `bestglm` para la obtención de modelos (variables ambientales 8,192 modelos y variables antropogénicas 32 modelos) y se compararon entre sí mediante el criterio de información de Akaike (AIC), obteniendo un conjunto ordenado del desempeño de los modelos. Considerando el enfoque “Information-Theoretic Approach” de Burnham y Anderson (1998), se eligió un subconjunto de modelos plausibles del total obtenido (consideramos el 10% de los mejores modelos para examinar) para determinar la importancia relativa de las variables mediante la suma de los pesos de Akaike. Posteriormente se seleccionó el mejor modelo teniendo como criterio el modelo de menor valor de AIC y se determinaron las variables que más influyen en número de atropellamientos.

### **III. RESULTADOS**

#### **III.1 Registros**

Se encontró un total de 189 individuos de anfibios y reptiles, correspondientes a 24 especies, de las cuales 13 fueron anfibios y 11 reptiles. El 83.6% de los registros fueron de organismos atropellados y 32.9% organismos vivos (Tabla 1). De los 158 organismos atropellados,

106 individuos (67.1%) son anfibios de 11 especies y 52 individuos (32.9%) reptiles de 10 especies.

En relación con el estado de riesgo, de acuerdo con la norma oficial mexicana NOM 059, el 50% de las especies se encuentran enlistadas en alguna categoría: dos especies bajo el estatus de Amenazada (A) y nueve especies sujetas a protección especial (Pr). En contraste, en la lista roja de la IUCN categoriza a cuatro de las especies en peligro de extinción, dos como vulnerables, cuatro casi amenazados y 14 de preocupación menor o con datos son deficientes (Tabla 1).

**Tabla 1.** Especies registradas durante el monitoreo sobre carreteras y rango altitudinal de ocurrencia. Estatus en NOM-059: A= Amenazada; Pr= Sujeta a protección especial; NE= No enlistada. Categorización por la UICN: EN= En peligro de extinción; VU= Vulnerable; NT= Casi amenazado; LC= Preocupación menor; DD= Datos deficientes.

Clase	Especie	Registros	Muertos	Vivos	NOM-059	UICN	Rango altitudinal (msnm)
<b>Amphibia</b>	<i>Charadrahyla esperancensis</i>	33	30	3	NE	VU	1640
	<i>Charadrahyla nephila</i>	11	9	2	Pr	EN	680-2856
	<i>Craugastor loki</i>	1	0	1	NE	LC	9-2100
	<i>Craugastor mexicanus</i>	2	2	0	NE	LC	1554-2700
	<i>Craugastor polymniae</i>	1	1	0	Pr	NT	1500
	<i>Craugastor sp.</i>	11	10	1	DESC	DESC	NA
	<i>Duellmanohyla ignicolor</i>	1	1	0	Pr	NT	680-1850
	<i>Exerodonta abdivita</i>	7	6	1	NE	NT	89-1600
	<i>Incilius spiculatus</i>	14	14	0	NE	EN	642-1758

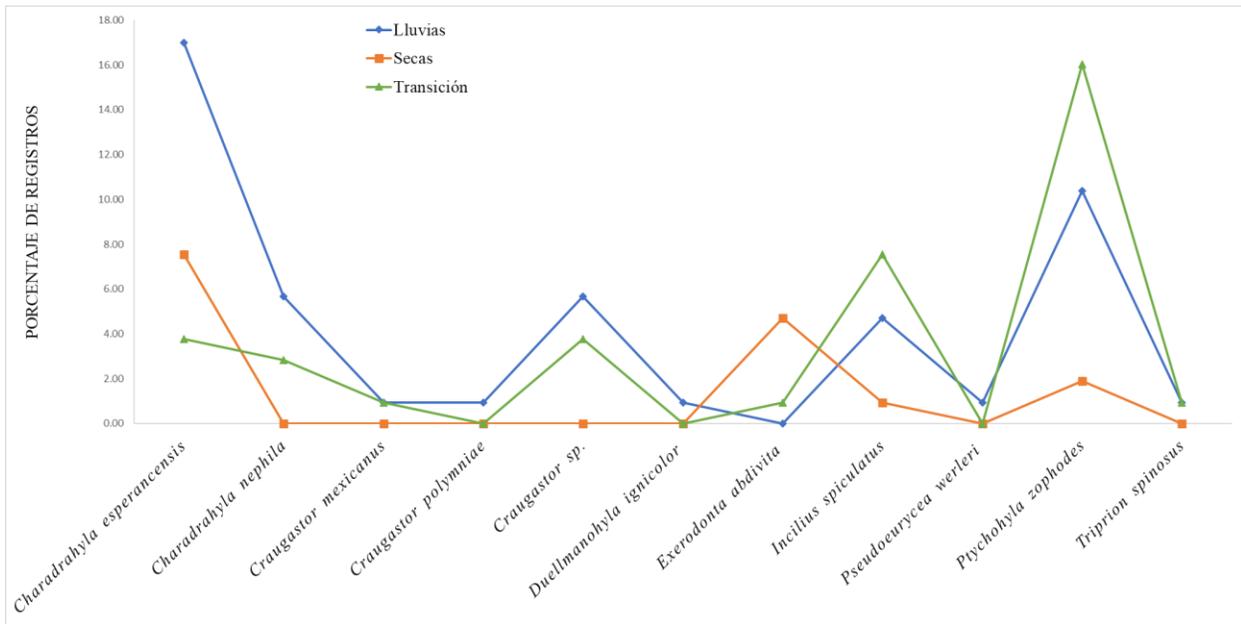
	<i>Pseudoeurycea werleri</i>	1	1	0	Pr	EN	900-1500
	<i>Ptychohyla zophodes</i>	35	30	5	NE	VU	400-1500
	<i>Thorius macdougalli</i>	1	0	1	Pr	EN	2000-2300
	<i>Tripurion spinosus</i>	2	2	0	NE	NT	800-2068
	<b>TOTAL</b>	<b>120</b>	<b>106</b>	<b>14</b>			
<b>Reptilia</b>	<i>Adelphicos visoninum</i>	4	3	1	NE	LC	0-1600
	<i>Barisia imbricata</i>	3	3	0	Pr	LC	2987-3962
	<i>Chryophis hallbergi</i>	3	3	0	A	DD	1865
	<i>Geophis duellmani</i>	46	34	12	Pr	LC	1750
	<i>Leptodeira polysticta</i>	1	0	1	NE	LC	0-2500
	<i>Metlapilcoatlus nummifer</i>	1	1	0	A	LC	40-1600
	<i>Ninia diademata</i>	5	3	2	NE	LC	0-1370
	<i>Rhadinaea bogertorum</i>	1	1	0	Pr	DD	2027
	<i>Sceloporus spinosus</i>	1	1	0	NE	LC	1500-2300
	<i>Scincella gemmingeri</i>	2	1	1	Pr	LC	200-2000
	<i>Tantilla schistosa</i>	2	2	0	NE	LC	0-1680
	<b>TOTAL</b>	<b>69</b>	<b>52</b>	<b>17</b>			

### III.2 Relación de atropellamientos con la temporada

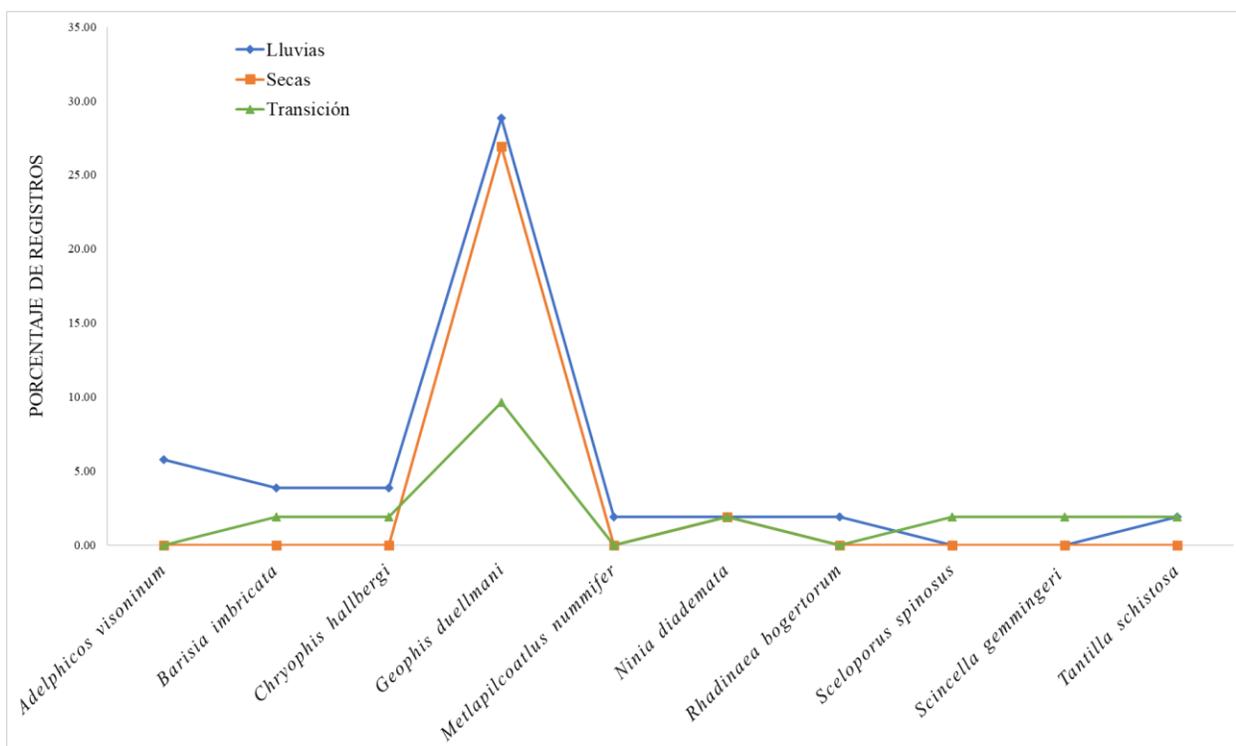
El 48.1% (106) de los anfibios atropellados fueron registrados en la temporada de lluvias, 36.8% durante las transición de temporadas y 15.1% durante la temporada de secas. En el caso de reptiles atropellados, el 50% se registró durante la temporada de lluvias, 21.2% durante las transiciones entre temporadas y 28.8% durante la temporada de secas.

Las especies de anfibios con más registros en la temporada de lluvias fueron *C. esperancensis* (16.98 %) y *P. zophodes* (10.38%). Durante las transiciones entre temporadas fueron *P. zophodes* (16.04%) e *I. spiculatus* (7.54%), y en la temporada de secas fueron *C. esperancensis* (7.55%) y *E. abdivita* (4.72%) (Figura 3).

Todas las especies de reptiles atropelladas presentaron registros que van de 1 a 3 individuos en las tres temporadas con excepción de *G. duellmani* (5-15 individuos). Esta especie fue la más importante para esta clase, con 34 cadáveres representando el 65.3% del total de reptiles y 21.5% del total de ambas clases. De acuerdo con los datos obtenidos, esta especie puede avistarse durante todo el año, aunque los picos de mayor atropellamiento se dieron durante la temporada de lluvias (28.8%) y secas (26.9%) (Figura 4).



**Figura 3.** Porcentaje de registros de anfibios atropellados en las tres temporadas de monitoreo.



**Figura 4.** Porcentaje de registros de reptiles atropellados en las tres temporadas de monitoreo.

### III.3 Zonas críticas atropellamiento de anfibios y reptiles

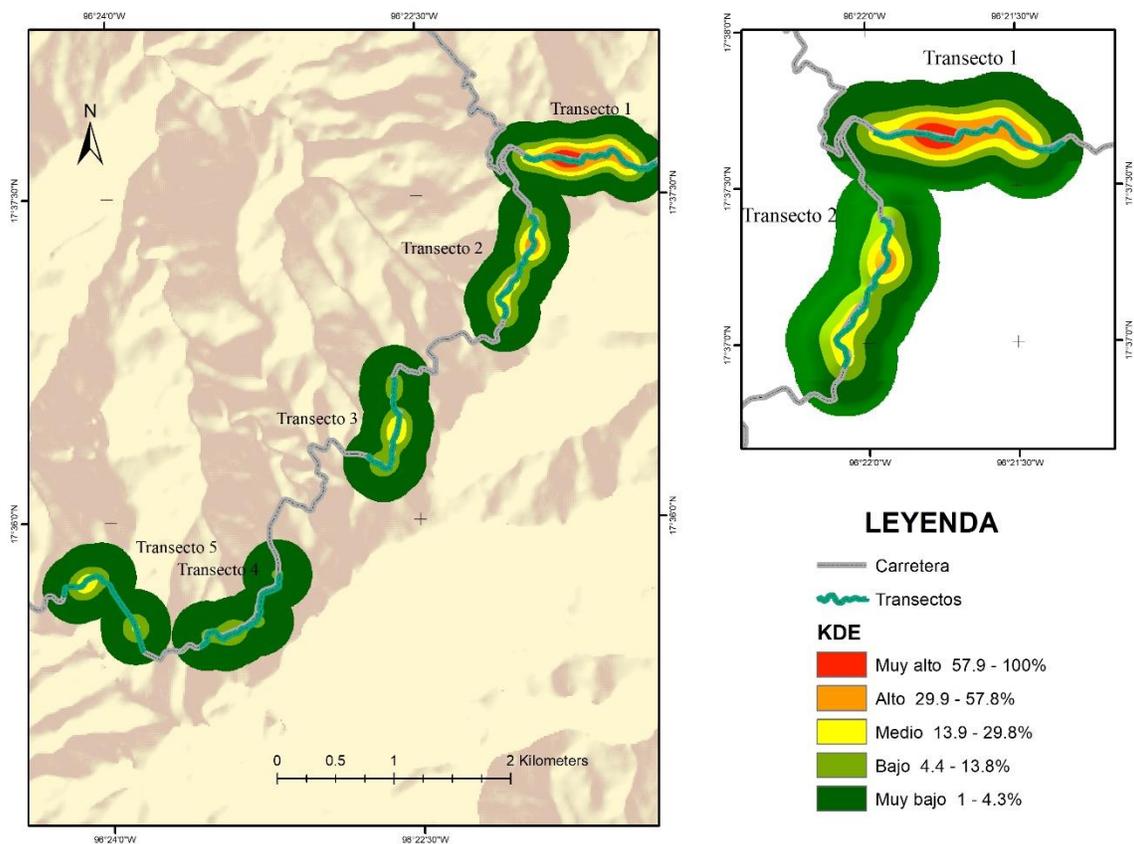
La mayor cantidad de organismos atropellados ocurrió en el transecto uno con (43.67% de los registros), seguido por el transecto dos (20.88%), el transecto tres (17.72%) y en los transectos cuatro y cinco (8.86 % cada uno) (Tabla 2).

**Tabla 2.** Registro de anfibios y reptiles atropellados por transecto durante los seis monitoreos.

Transectos	Longitud	Anfibios	Reptiles	Total
T1	1.295 km	57 (36.08 %)	12 (7.59 %)	69 (43.67 %)
T2	1.083 km	22 (13.92 %)	11 (6.96 %)	33 (20.88 %)
T3	1.052 km	12 (7.59 %)	16 (10.13 %)	28 (17.72 %)
T4	1.168 km	6 (3.79 %)	8 (5.07 %)	14 (8.86 %)
T5	1.179 km	9 (5.70 %)	5 (3.16 %)	14 (8.86 %)
<b>Total</b>	<b>5,777.16 m</b>	<b>106 (67.09 %)</b>	<b>52 (32.91 %)</b>	<b>158 (100%)</b>

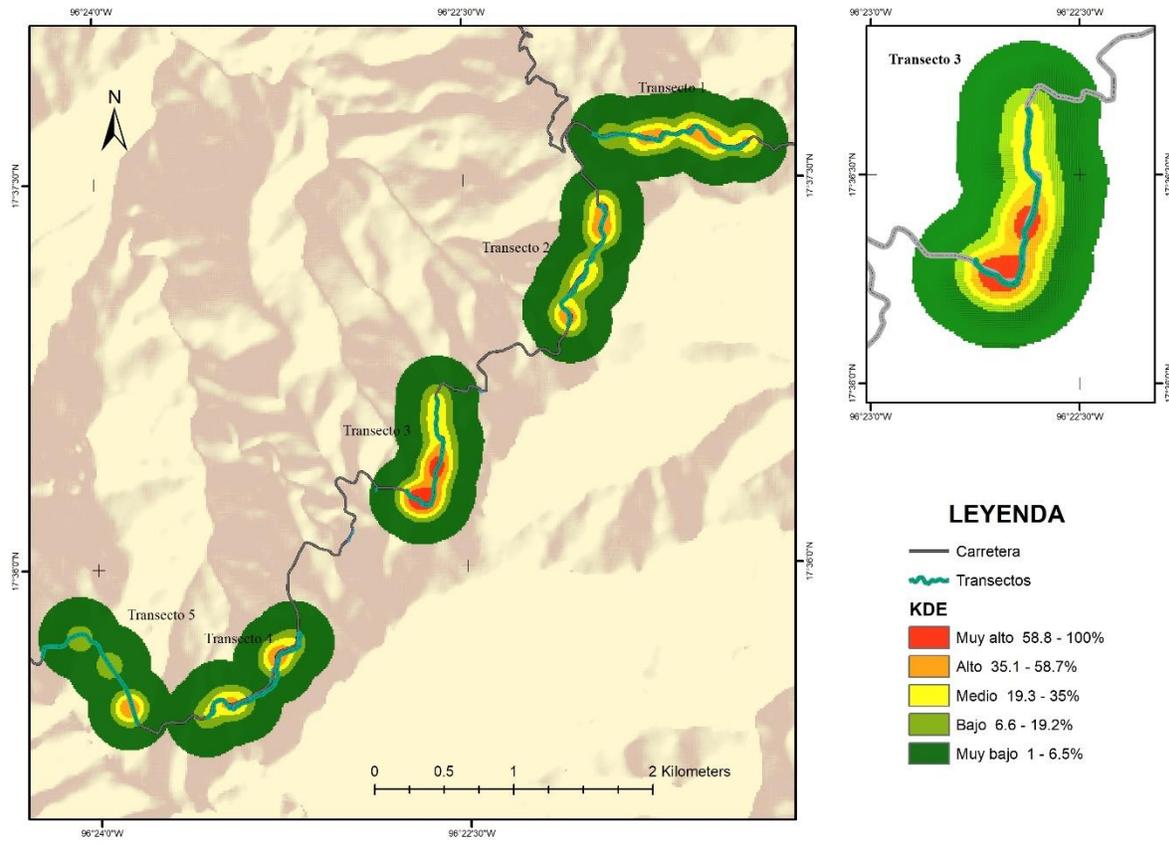
El método de clasificación: rupturas naturales de Jenks identificó cinco categorías de riesgo basado en la densidad de atropellamientos. Para anfibios, la categoría muy bajo fue de 1 a 4.3%, bajo de 4.4 a 13.8%, medio de 13.9 a 29.8, alto de 29.9 a 57.8% y muy alto de 57.9 a 100% mientras que para los reptiles: la categoría muy bajo fue de 1 a 6.5 %, bajo de 6.6 a 19.2, medio de 19.3 a 35%, alto de 35.1 a 58.7 y muy alto de 57.8 a 100%.

Se identificaron dos zonas críticas de anfibios localizados en el transecto 1 y 2 y de acuerdo con la densidad de organismos atropellados, el transecto uno se identificó en la categoría muy alto, mientras que el transecto 2 en la categoría de alto (Figura 5).



**Figura 5.** Zonas críticas de atropellamientos para anfibios dentro de los cinco transectos.

Para el caso de los reptiles las zonas críticas se encuentran distribuidos en todos los transectos con categoría alta a excepción del transecto tres con categoría muy alta (Figura 6).

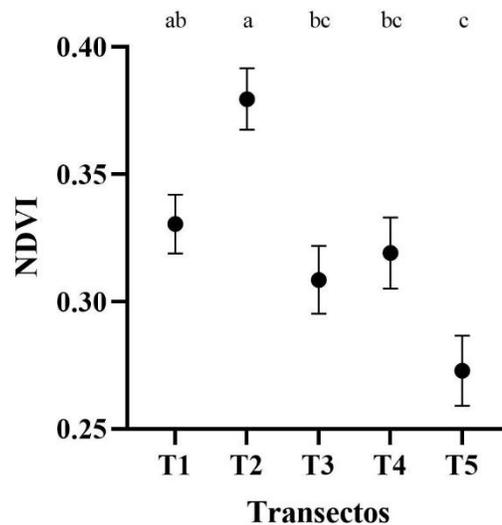


**Figura 6.** Zonas críticas de atropellamientos dentro de los cinco transectos.

### III.4 Variables ambientales asociados a las muertes por atropellamiento

#### Índice diferencial de vegetación normalizada (NDVI)

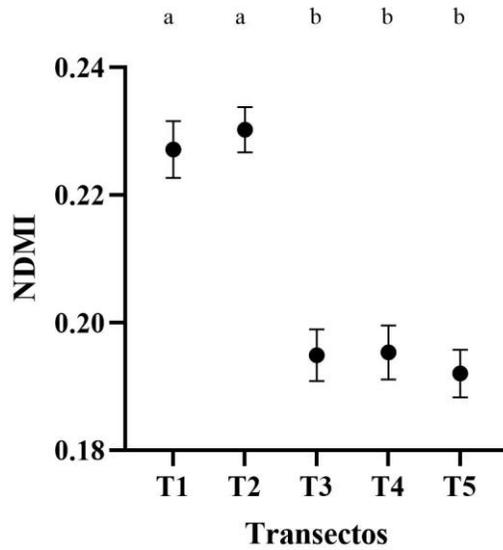
Los transectos mostraron diferencias significativas en el índice de vegetación ( $X^2_{(4)} = 49.61; P = 0.0001$ ). El transecto 1 ( $\bar{x} = 0.330394 \pm 0.01296$ ) junto con el transecto 2 ( $\bar{x} = 0.379479 \pm 0.01296$ ) tienen mejor índice de vegetación que los transectos 3 ( $0.308448 \pm 0.01296$ ), 4 ( $0.319028 \pm 0.01296$ ) y 5 ( $\bar{x} = 0.272774 \pm 0.01296$ ). La prueba posthoc de Tukey y Kramer mostró que el transecto 2 es el que presenta mejor salud en la vegetación mientras que el transecto 5 es la peor (Figura 7).



**Figura 7.** Diferencias ( $\bar{x} \pm ES$ ) entre la salud de vegetación de los cinco transectos en el área de estudio. Las letras corresponden a la prueba de Tukey.

#### Índice diferencial de humedad normalizada (NDMI)

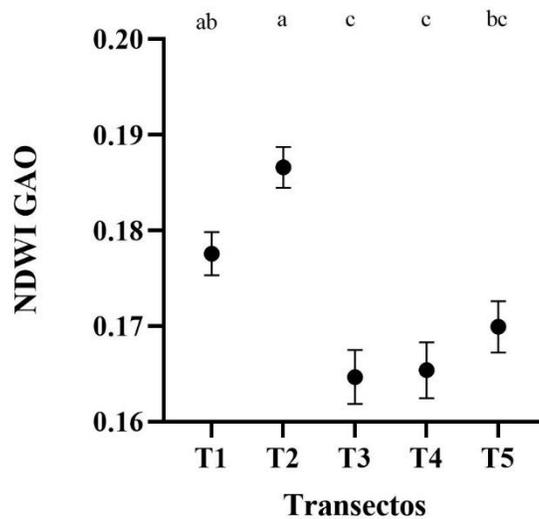
Los transectos también mostraron diferencias en humedad foliar ( $X^2_{(4)} = 72.7804; P = 0.0001$ ). El transecto 1 ( $\bar{x} = 0.227115 \pm 0.00401$ ) y 2 ( $\bar{x} = 0.230222 \pm 0.00401$ ) son los que presentaron mayor índice de humedad foliar y ambos son diferentes de los transectos 3 ( $\bar{x} = 0.194875 \pm 0.00401$ ), 4 ( $\bar{x} = 0.195305 \pm 0.00401$ ) y 5 ( $\bar{x} = 0.192007 \pm 0.00401$ ). La prueba posthoc identifica a los transectos 1 y 2 como iguales pero diferentes del 3, 4 y 5 (Figura 8).



**Figura 8.** Diferencias ( $\bar{x} \pm SE$ ) en el índice de humedad en los cinco transectos en el área de estudio. Las letras corresponden a la prueba de Tukey.

#### Índice diferencial de agua normalizada (NDWI, GAO)

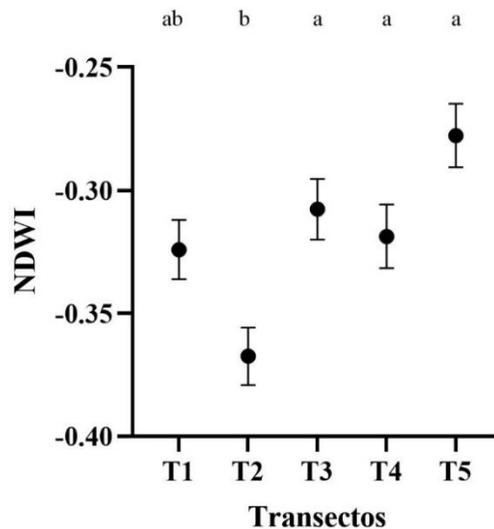
Se encontraron diferencias significativas entre transectos respecto al índice de estrés hídrico en la vegetación ( $X^2_{(4)} = 33.69$ ;  $P = 0.0001$ ). Los transectos 1 ( $\bar{x} = 0.177548 \pm 0.00258$ ) y 2 ( $\bar{x} = 0.186592 \pm 0.00258$ ) presentan mayor cantidad de agua en la vegetación; el T2 es diferente los transectos 3 ( $\bar{x} = 0.164660 \pm 0.00258$ ), 4 ( $\bar{x} = 0.165371 \pm 0.00258$ ) y 5 ( $\bar{x} = 0.169904 \pm 0.00258$ ) (Figura 10).



**Figura 9.** Diferencias ( $\bar{x} \pm SE$ ) en el contenido de agua en la vegetación entre transectos. Las letras corresponden a la prueba de Tukey.

### Indice diferencial de agua normalizada (NDWI, McFeeters)

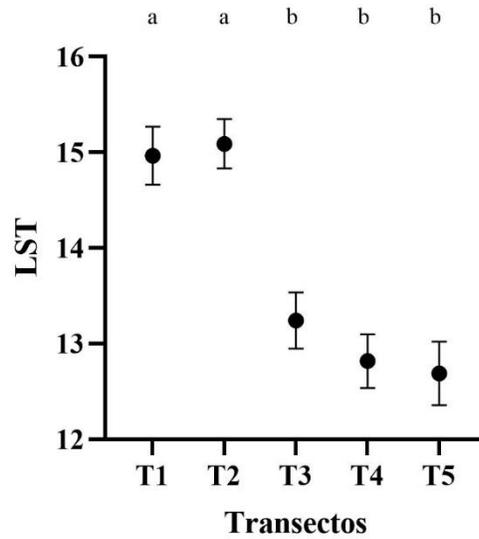
En cuanto al número de cuerpos de agua presentes, se encontraron diferencias significativas entre transectos ( $X^2_{(4)} = 35.66$ ;  $P = 0.0001$ ). El transecto 2 ( $\bar{x} = -0.32414 \pm 0.01240$ ) es el que menos cuerpos de agua presenta y es diferente de los transectos 3 ( $\bar{x} = -0.30775 \pm 0.01240$ ), 4 ( $\bar{x} = -0.31878 \pm 0.01240$ ) y 5 ( $\bar{x} = -0.27776 \pm 0.01240$ ) (Figura 9).



**Figura 10.** Diferencias ( $\bar{x} \pm SE$ ) en el número de cuerpos de agua presentes en los transectos. Las letras corresponden a la prueba de Tukey.

### Temperatura de la Superficie (LST)

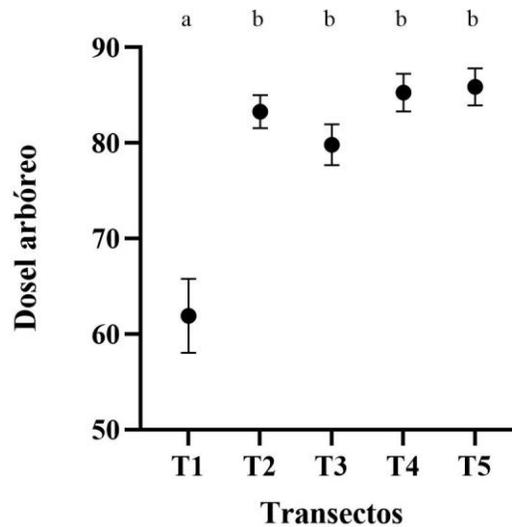
En relación con la temperatura de la superficie, se encontraron diferencias entre transectos ( $X^2_{(4)} = 167.07$ ;  $P = 0.0001$ ). Los transectos 1 ( $\bar{x} = 14.9652 \pm 0.29469$ ) y 2 ( $\bar{x} = 15.0894 \pm 0.29469$ ) presentan mayor temperatura y difieren de los transectos 3 ( $13.2405 \pm 0.29469$ ), 4 ( $12.8169 \pm 0.29469$ ) y 5 ( $\bar{x} = 12.6885 \pm 0.29469$ ) (Figura 11).



**Figura 11.** Temperaturas de la superficie entre transectos ( $\bar{x} \pm SE$ ). Las letras corresponden a la prueba de Tukey.

### Cobertura de dosel arbóreo

Los transectos presentaron diferencias en la cobertura dosel del arbóreo ( $X^2_{(4)} = 29.62$ ;  $P = 0.0001$ ). El transecto 1 presentó menor dosel arbóreo ( $\bar{x} = 61.9101 \pm 2.4257$ ) que los demás (T2  $\bar{x} = 83.2854 \pm 2.6629$ ; T3  $\bar{x} = 79.8186 \pm 22.6294$ ; T4  $\bar{x} = 85.2871 \pm 2.5660$  y T5  $\bar{x} = 85.8795 \pm 2.5971$ ) (Figura 12)



**Figura 12.** Porcentaje de la cobertura de dosel arbóreo en los cinco transectos ( $\bar{x} \pm SE$ ). Las letras corresponden a la prueba de Tukey.

### III.5 Modelos Lineales Generalizados (GLM)

Con base en los resultados de la correlación de Spearman, las variables ambientales que se incluyeron en el análisis para los anfibios fueron: dosel arbóreo, altitud, pendiente, presión barométrica, enfriamiento del viento, temperatura de cubeta mojada, temperatura del sustrato, humedad relativa, NDWI (GAO), NDVI, distancia a cuerpos de agua, velocidad del viento y temporada; para el caso de los reptiles fueron: distancia a cuerpos de agua, presión barométrica, velocidad del viento, altitud, dosel arbóreo, punto de rocío, humedad relativa, pendiente, temperatura del sustrato, NVID, NDWI (GAO) y temporada. Las variables antropogénicas fueron consideradas en su totalidad ya que eran adecuadas para el análisis.

Se obtuvo un listado de las variables de acuerdo con el orden de importancia para predecir el atropellamiento de anfibios y reptiles según la suma de los pesos de Akaike (Tabla 3 y 6).

**Tabla 3.** Variables ambientales y antropogénicas y su nivel de asociación en el atropellamiento de anfibios.

Anfibios			
Variables ambientales	Suma de los pesos de Akaike (AIC)	Variables antropogénicas	Suma de los pesos de Akaike
Dosel arbóreo	0.999	Pendiente en talud derecho	0.960
Altitud	0.587	Distancia-antropogénicas	0.882
Pendiente del área	0.530	Turno	0.820
Presión barométrica	0.424	Pendiente en talud izquierdo	0.175
Enfriamiento del viento	0.228	Día de la semana	0.0004
Temperatura de cubeta mojada	0.215		
Temperatura del sustrato	0.213		
Humedad relativa	0.169		
NDWI (GAO)	0.163		
NDVI	0.159		
Distancia a cuerpos de agua	0.157		
Velocidad del viento	0.139		
Temporada	0.030		

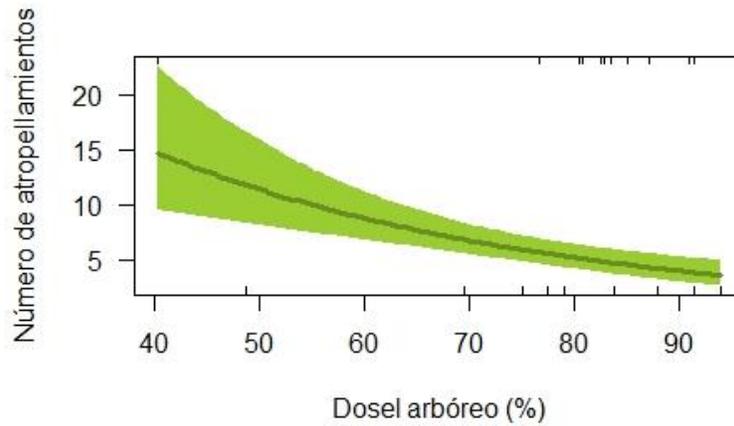
El mejor modelo de acuerdo con el AIC presentó un valor de 89.167 donde las variables de mayor peso para explicar el alto número de atropellamientos de anfibios en las zonas críticas de fatalidad fueron: el dosel arbóreo, la presión barométrica y la pendiente (Tabla 4). Los sitios asociados a encuentros con anfibios atropellados presentaron bajo porcentaje de dosel arbóreo,

durante momentos donde la presión barométrica aumentó y donde el área de estudio presentó una pendiente baja (Figura 13, 14 y 15).

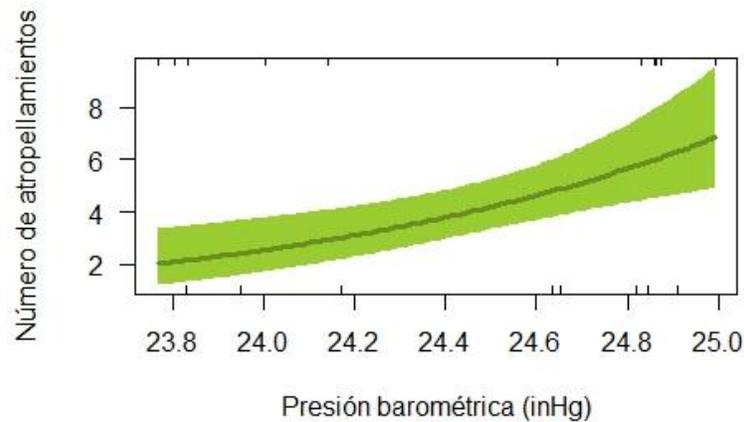
**Tabla 4.** Mejor modelo del GLM para la predicción de atropellamiento de anfibios de acuerdo con las variables ambientales

VARIABLES	Estimate	Std. error	Z value	Pr(> Z )
(Intercept)	-19.501183	7.366140	-2.647	0.008111**
Dosel arbóreo	-0.026245	0.005974	-4.393	0.0000112***
Presión barométrica	0.991815	0.291448	3.403	0.000666***
Pendiente	-0.038114	0.015396	-2.476	0.013301*

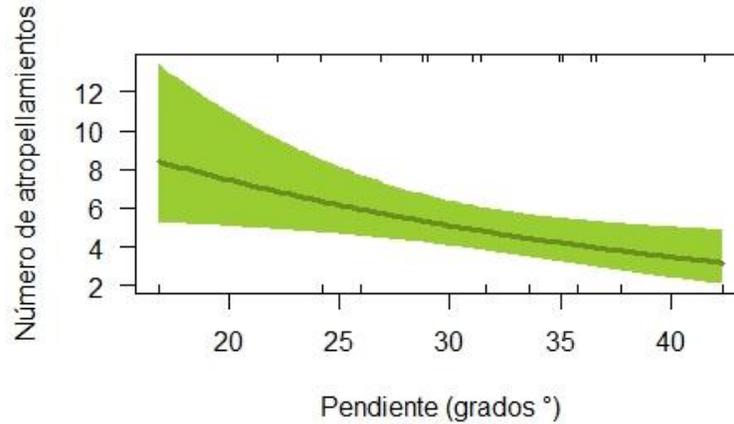
AIC: 89.167



**Figura 13.** Predicción del número de atropellamientos de anfibios según el porcentaje de dosel arbóreo.



**Figura 14.** Predicción del número de atropellamientos de anfibios según la variación en la presión barométrica.

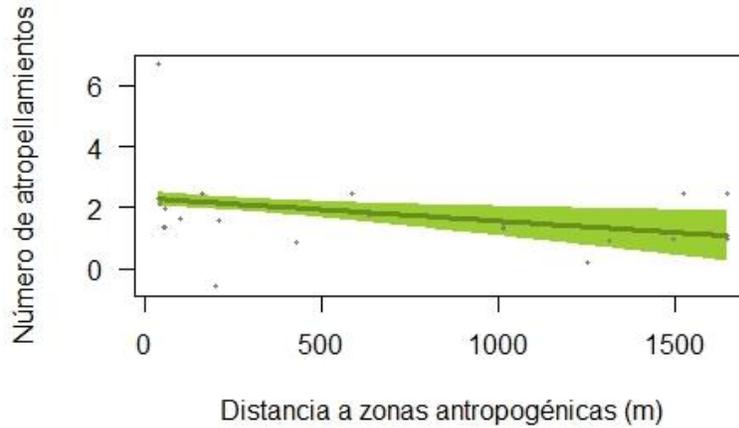


**Figura 15.** Predicción del número de atropellamientos de anfibios según la pendiente del área.

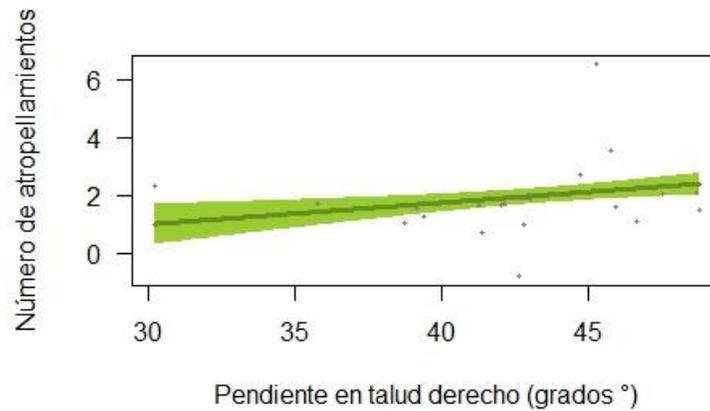
Las variables antropogénicas que mejor predicen el atropellamiento de anfibios fueron: la distancia a zonas antropogénicas, pendiente del talud derecho en cuneta y el turno. El número de atropellamientos aumenta conforme la distancia a los sitios usados por el hombre disminuye, cuando la pendiente en cunetas aumenta y durante el primer horario de monitoreo (Figura 16, 17 y 18).

**Tabla 5.** Mejor modelo del GLM para la predicción de atropellamiento de anfibios de acuerdo con las variables antropogénicas.

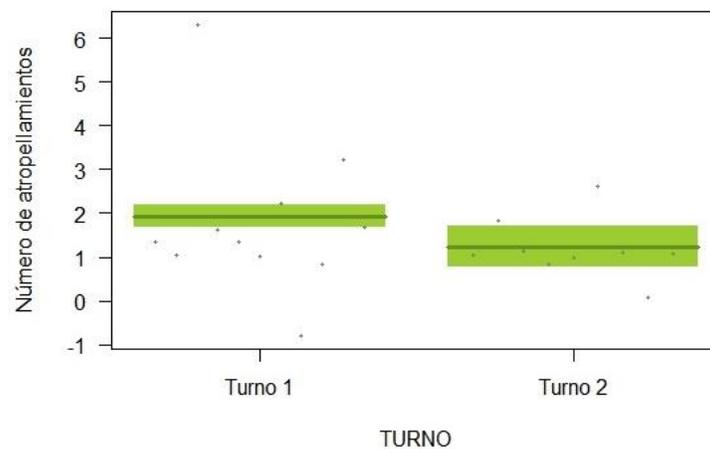
Variables	Estimate	Std. error	Z value	Pr(> Z )
(Intercept)	-1.5920722	1.1958570	-1.331	0.18308**
Distancia-antropogénicas	-0.0007462	0.0002821	-2.645	0.00818**
Pendiente en talud derecho	0.0750178	0.0248671	3.017	0.00255**
Turno	0.7045042	0.3026171	2.328	0.01991*
AIC: 109.63				



**Figura 16.** Predicción del número de atropellamientos de anfibios según la distancia a zonas antropogénicas.



**Figura 17.** Predicción del número de atropellamientos de anfibios de acuerdo con la pendiente en el talud derecho de la cuneta.



**Figura 18.** Predicción del número de atropellamientos de anfibios según el turno de monitoreo.

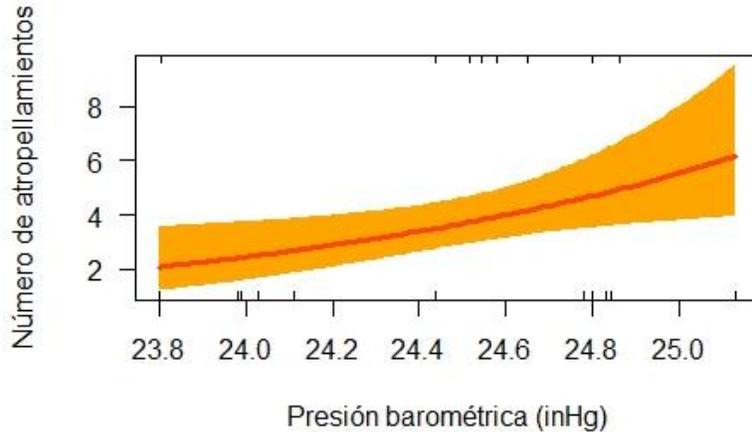
Para el caso de los reptiles las zonas críticas se encuentran distribuidos en todos los transectos, por lo que los índices de vegetación, humedad, agua y temperaturas no mostraron influencia sobre el atropellamiento. Por otra parte, las variables ambientales que predicen mejor el atropellamiento de reptiles fueron la presión barométrica y distancia a cuerpos de agua (Tabla 7). A mayor presión barométrica y menor distancia a cuerpos de agua mayor número de atropellamientos (Figura 19 y 20).

**Tabla 6.** Variables ambientales y antropogénicas, y su nivel de asociación en el atropellamiento de reptiles.

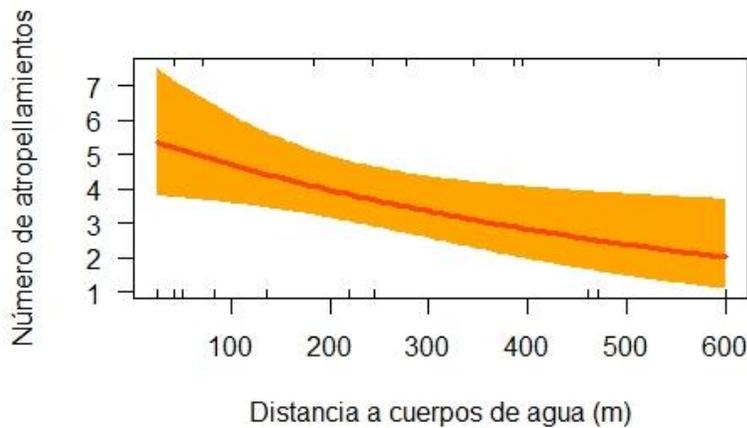
<b>REPTILES</b>			
<b>Variables bióticas-ambientales</b>	<b>Suma de los pesos de Akaike</b>	<b>Variables antropogénicas</b>	<b>Suma de los pesos de Akaike</b>
Distancia a cuerpos de agua	0.59430247	Pendiente en talud izquierdo	0.541890001
Presión barométrica	0.54403292	Turno	0.432724909
Velocidad del viento	0.38438150	Distancia-antropogénicas	0.324790354
Altitud	0.22696046	Pendiente en talud derecho	0.274103480
Dosel arbóreo	0.18942912	Día de la semana	0.260559324
Punto de rocío	0.18130094		
Humedad relativa	0.17881849		
Pendiente	0.17686801		
Temperatura del sustrato	0.17081762		
NDVI	0.15774766		
NDWI_GAO	0.15013141		
Temporada	0.03398735		

**Tabla 7.** Mejor modelo del GLM para la predicción de atropellamiento de reptiles de acuerdo con las variables ambientales.

Variables	Estimate	Std. error	Z value	Pr(> Z )
(Intercept)	-1.822e+01	8.104e+00	-2.248	0.0246*
Presión barométrica	8.129e-01	3.319e-01	2.449	0.0143*
Distancia a cuerpos de agua	-1.703e-03	7.307e-04	-2.331	0.0198*
AIC: 77.087				



**Figura 19.** Predicción del número de atropellamientos de reptiles según los cambios en la presión barométrica.



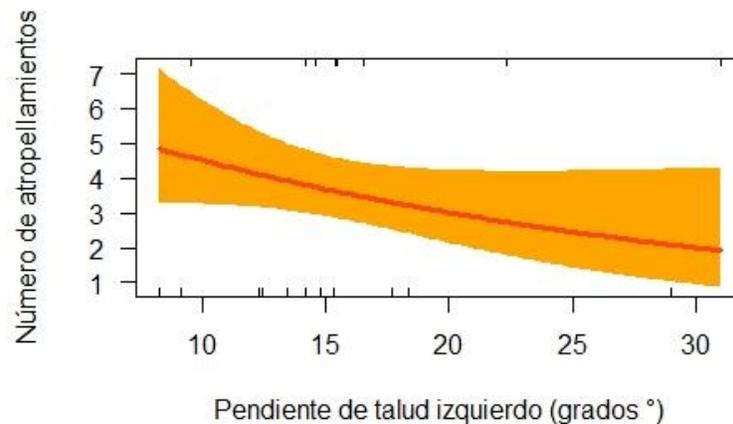
**Figura 20.** Predicción del número de atropellamientos de reptiles según la distancia a cuerpos de agua.

Para las variables antropogénicas, a pesar de que el mejor modelo en los GLM identificó a la “pendiente del talud izquierdo de la cuneta” como la más asociada a la muerte de reptiles, ésta no fue significativa, por lo que no se consideró importante para este estudio (Tabla 8). Sin embargo, a pesar de que la variable pendiente de talud izquierdo no resultó significativa ( $P=0.09$ ) se observa una tendencia, donde el número de atropellamientos está positivamente correlacionado con la disminución en la pendiente del talud izquierdo (Figura 21).

**Tabla 8.** Mejor modelo del GLM para la predicción de atropellamiento de reptiles de acuerdo con las variables antropogénicas

VARIABLES	Estimate	Std. error	Z value	Pr(> Z )
(Intercept)	1.91194	0.37722	5.069	4.01e-07***
Pendiente en talud izquierdo	-0.04050	0.02414	-1.677	0.0934

AIC: 78.193



**Figura 21.** Tendencia del número de atropellamientos de reptiles según la pendiente del talud izquierdo de la cuneta.

#### IV. DISCUSIÓN

Las zonas críticas de atropellamiento no se distribuyeron de manera aleatoria, sino que se concentraron en zonas de la carretera con menor dosel arbóreo, más cercanas a cuerpos de agua, áreas de baja pendiente, más cercanas a áreas antropizadas. También identificamos un notable incremento de cadáveres durante la temporada de lluvias. Estas variables han sido identificadas en otros estudios como importantes en el atropellamiento de vertebrados (Clevenger et al., 2003; D’Amico et al., 2015; Ciochetti et al., 2017; Medrano-Vizcaíno y Espinosa 2021).

Las temporadas del año juegan un papel importante en la actividad de muchos organismos y está asociado a las altas tasas de atropellamiento. Nuestros resultados muestran que el número de atropellamientos varió entre las temporadas siendo mayor durante la temporada de lluvias. En este periodo, dos especies de anfibios, *P. zophodes*, *C. esperancensis*, y una de reptiles *G. duellmani* presentaron los valores más altos de atropellamientos. Consideramos que esto está relacionado con el incremento de la actividad debido a la época reproductiva la cual puede estar asociada a la temporada de lluvias (Vijayakumar et al., 2001; Sánchez-Acuña y Benítez, 2021). Desafortunadamente, para la especie *G. duellmani*, no se conoce la temporada reproductiva, sin

embargo, se sabe que durante la temporada de lluvias muchas especies aumentan su actividad porque en esa época la abundancia de alimento aumenta (Sales y Freire, 2015; Greeff y Whiting, 2000), nuestros datos mostraron que esta especie puede avistarse durante todo el año, pero tiene picos de mayor atropellamiento durante la temporada de lluvias. Conviene determinar si las muertes de esta especie en dicha temporada están relacionadas a la disponibilidad de alimento y/o a la época reproductiva (Monroy, 2015; Sánchez-Acuña y Benítez, 2021).

En las transiciones entre temporadas, *P. zophodes* e *I. spiculatus* fueron las de mayor registro junto con *G. duellmani*. Por una parte, estas especies de anfibios incrementan su actividad durante esta temporada para diferentes fines; a *P. zophodes* se le puede observar con mayor frecuencia vocalizando previo a la temporada de lluvias (Campbell y Duellman, 2000). Se sabe que *I. spiculatus* se reproduce durante la época de secas por lo que probablemente aprovecha la transición entre temporadas para realizar recorridos hacia y desde cuerpos de agua perennes óptimos para la reproducción (Arreortúa *et al.*, 2021). Los registros de *G. duellmani* disminuyeron más de un 50% durante esta temporada, sin embargo, siguió siendo la especie de reptil con mayor número de registros. La falta de conocimiento biológico y ecológico de esta especie impiden entender las motivaciones por las que cruza la carretera, sin embargo, es posible que presente alguna preferencia por características de ésta.

En la temporada de secas, la abundancia de atropellamientos se redujo para la mayoría de las especies siendo *E. abdivita* y *C. esperancensis* las más representativas. Para *E. abdivita*, estos hallazgos coinciden con otros reportes que la señalan como una especie activa durante la temporada de secas (Campbell y Duellman, 2000; Amphibiaweb, 2022). Para el caso de *C. esperancensis*, a pesar de que es una especie de la cual se desconoce su historia de vida, su presencia durante las tres temporadas indica que ésta está activa durante todo el año, pero con una marcada disminución durante las temporadas de secas y transiciones. Este tipo de datos ecológicos son una parte fundamental para entender la historia de vida de estas especies (Campbell y Duellman, 2000; Wells, 2007).

Se ha observado que el atropellamiento de vertebrados está asociado a características del entorno de la carretera. Por ejemplo, la distribución ecológica y geográfica de anfibios se debe a su fisiología, comportamiento y a la atracción de factores ambientales como la temperatura, precipitación y humedad en el aire (Duellman, 1999). En este estudio, las zonas de mayor atropellamiento para anfibios se asociaron principalmente a buenos índices de humedad, mayor

contenido de agua y mejor salud de vegetación. A pesar de que las condiciones generales de las zonas críticas son mejores e importantes para la presencia de anfibios en comparación con los demás transectos, estas áreas también presentan espacios antropizados, los cuales fueron identificados como factor importante de atropellamiento. Sousa-Guedes et al. (2021), demostró a través de varios modelos espaciales, que el número de organismos atropellados aumentaba cuando las áreas antropizadas se encontraban cerca. En la comunidad de la Esperanza, las construcciones humanas y áreas de actividad económica o de subsistencia como la agricultura y recientemente la ganadería, demandan la transformación de espacios naturales ocasionando variaciones en el ambiente como el aumento de temperatura en zonas sin vegetación (Zambrano et al., 2014). Estos espacios modificados tendrían un efecto sobre algunas especies menos tolerantes a estos cambios, obligándolos a desplazarse a sitios con mejores condiciones (Snyder y Wheathers 1975).

Las zonas antropizadas han implicado la remoción de vegetación natural en la zona, lo cual se evidencia con el bajo dosel arbóreo, variable ambiental más importante en la muerte de anfibios, a menor cobertura de dosel hubo un mayor número de atropellamientos. Se ha reportado el efecto de atracción que las carreteras tienen sobre la fauna silvestre (Benítez y Escalona-Segura, 2021). Para el caso de anfibios y reptiles, es probable que los individuos busquen para su termorregulación sitios más cálidos sobre o cerca de carreteras propiciados por el bajo dosel arbóreo; en zonas importantes como los corredores biológicos con estas características podrían aumentar el número de atropellamientos (Benítez et al, 2021) y, por lo tanto, un factor importante de atropellamiento. Por otra parte, la luz artificial también puede ser un punto de atracción para insectos que forman parte de su dieta, se sabe que otras especies de anfibios explotan ese recurso antropogénico para alimentarse (Touzot et al., 2020). Individuos de *C. esperancensis* fueron encontrados cerca de construcciones humanas durante la noche, por lo que es conveniente estudiar si es debido a la atracción por los insectos que se concentran en los alumbrados. En este sentido el cruce de los anfibios sobre carreteras en área de estudio puede deberse no solo a épocas de reproducción, sino también a los cambios ambientales del área utilizable por los organismos durante las temporadas del año y que han sido producto de las modificaciones humanas.

Existen variables ambientales como la temperatura, humedad, velocidad del viento y presión barométrica que pueden influir en el comportamiento de algunos organismos (Steelman y Dorcas, 2010). En nuestro estudio se observó que a mayor presión barométrica mayor número de atropellamientos de anfibios y reptiles. Se ha demostrado que ambos grupos son capaces de

detectar cambios en la presión barométrica; a los anfibios se les asocia por su necesidad de hidratación (Hillyard, 1999) por lo que probablemente relacionen estas variaciones con la presencia de lluvias, factor que incentiva su dispersión en busca de mejores condiciones para sus actividades fenológicas. Esta variable también puede tener un efecto directo en los anfibios al provocar una disminución en la frecuencia de vocalizaciones (Steelman y Dorcas, 2010), dificultando así el encuentro de parejas (Gerhardt y Klumb, 1998), lo que implicaría un mayor desplazamiento para fines de reproducción y por lo tanto un incremento en el riesgo de muerte por atropellamiento (Hels y Buchwalt, 2001). Para los reptiles, la asociación entre la presión barométrica y la presencia de lluvias significaría una mayor actividad por la disponibilidad de alimento; por ejemplo, Sánchez-Acuña y Benítez (2021) encontraron que la herpetofauna tiene mayor tasa de atropellamiento en temporada de lluvias sugiriendo que algunas especies de anfibios y reptiles amplían su distribución en esta temporada por la disponibilidad de alimento.

Los anfibios y reptiles son considerados como organismos de baja capacidad de dispersión en comparación con los demás grupos de vertebrados, más aún en sitios con topografía compleja que podrían influir en la distribución de especies (Goncalves et al., 2016). En el presente estudio encontramos que los sitios de mayor número de atropellamientos en anfibios estuvieron asociados a la pendiente del área, a menor pendiente el número de atropellamientos incrementó. Durante el movimiento de los organismos, la interferencia de una pendiente pronunciada puede implicar un mayor gasto de energía (Lowe, 2009) por lo que puede tener un efecto disuasivo que provoca que los organismos cambien su ruta de dispersión (Mims et al., 2015). Probablemente algunas especies permanecen mayor tiempo sobre la carretera en busca de lugares con menor pendiente para desplazarse, aumentando el riesgo de morir atropelladas, como el caso de algunas aves que aumenta su riesgo de atropellamiento al estar más tiempo sobre carreteras (Jacobson, 2005).

Adicionalmente, la configuración de la carretera, en este caso la pendiente en los taludes de las cunetas influyó en los atropellamientos. A mayor pendiente en el talud derecho de la cuneta, el cual se encuentra en contacto con el corte o la pared de la montaña, mayor número de atropellamientos. Como se ha mencionado los sitios con menor pendiente parecen ser preferentes para los anfibios durante sus desplazamientos, por lo que cuando estos organismos se encuentran ante estructuras como los taludes, que pueden superar los 50° de inclinación y que generalmente contienen corrientes de agua, probablemente busquen sitios con mejores condiciones para cruzar, exponiéndolas al tráfico vehicular por más tiempo.

Por naturaleza, todos los seres vivos necesitan de agua y generalmente los sitios con cuerpos de aguas estarán asociados a una gran variedad de organismos que dependen de ella; en ese sentido los cuerpos de agua adyacentes a las carreteras se encontraron asociados a la muerte de reptiles, a menor distancia de cuerpos de agua mayor fue el número de atropellamientos. Otros estudios han identificado esta asociación tanto en reptiles como en anfibios (Clevenger et al., 2003; Das et al., 2007; Glista et al., 2008) y se ha hipotetizado que las condiciones favorables en cuanto a disponibilidad de alimento y anidación en estos sitios (Benítez et al., 2021) probablemente funcionen como atrayente y consecuentemente reflejen un punto importante de atropellamiento; de esta manera estas zonas siempre serán importantes para acciones de mitigación.

Por último, se registró una mayor cantidad de cadáveres de anfibios durante el primer monitoreo (21:00 a 01:00 hrs.) en comparación con el segundo (05:00 a 09:00 hrs.). Esto puede deberse a una mayor actividad de los anfibios en las primeras horas de la noche, la cual disminuye a medida que la temperatura decrece conforme transcurre la noche (Harvey-Pough, 2007). Algunos estudios han asociado el incremento en el número de organismos atropellados con el incremento en el tráfico vehicular (Seijas et al, 2013; Zhang et al. 2018), sin embargo, para este estudio no se encontraron diferencias entre el número de vehículos por turno de monitoreo.

A pesar de que la variable nivel altitudinal no resultó relevante dentro de los GLM, ésta fue una de las cuatro más importantes según los pesos de Akaike para cada grupo. Su importancia también fue identificada cuando el número de cadáveres decreció conforme aumentaba el nivel altitudinal; esto se debe a que la mayoría de las especies registradas tienen como límite altitudinal superior los 1,800 msnm., altitud a la que se ubican los primeros tres transectos. Este ejemplo resalta la importancia de comprender que los atropellamientos estarán asociados a múltiples variables y que los modelos lineales generalizados solo nos ayudan a acercarnos a los componentes más importantes para predecir el atropellamiento de vida silvestre.

La comunidad de la Esperanza se caracteriza por su modelo de conservación mediante áreas destinadas voluntariamente a la conservación (ADVC). Sin embargo, los estudios en esta comunidad se han centrado solo en mamíferos de talla grande y aves, descuidando a los anfibios y reptiles. Sobre la carretera federal 175, pueden observarse señales y letreros advirtiendo la presencia de vida silvestre, no obstante, estas estrategias preventivas siguen siendo ineficaces y tienen poco o ningún efecto en el tránsito vehicular (Glista et al., 2008), por lo que es necesario

crear estructuras que faciliten el movimiento y que aseguren el cruce a la fauna silvestre durante su dispersión y migración.

Además, las cunetas adyacentes a las carreteras junto con los drenajes, mal llamados pasos de fauna, que fueron diseñadas exclusivamente para la captación de agua de los escurrimientos y evitar daños a la carretera, podrían estar funcionando como una barrera más para la vida silvestre. Si consideramos que los escurrimientos de agua son perennes y que la pendiente característica del lugar aumenta la velocidad del flujo de agua (puede alcanzar hasta 1.3 m/s en temporada de secas aumentando considerablemente en temporada de lluvias. Estas características dificultan la dispersión de pequeños organismos que intentan cruzarlas, provocando su arrastre y/o ahogamiento, convirtiéndolas en trampas ecológicas (González-Gallina y Téllez-Torres, 2021). Precipitaciones que van desde los 500 hasta 700 mm/mes, característico del BMM, parece jugar en contra de la temporada de mayor actividad de anfibios y reptiles.

Estas zonas identificadas como críticas por el alto número de atropellamiento para anfibios y reptiles resultan importantes para tomar medidas de prevención y mitigación dentro del BMM. Teniendo en cuenta que gran parte de las especies registradas se encuentran en alguna categoría de riesgo conviene evaluar el impacto a nivel poblacional de estos atropellamientos, así como encontrar formas eficientes que reduzcan las muertes en esos sitios. Para ello, se propone crear pasos de fauna subterráneos con las dimensiones adecuadas que permitan salvaguardar la integridad de los anfibios y reptiles durante sus desplazamientos.

Clevenger et al. (2003) encontró una tendencia en el atropellamiento lejos de pasos de fauna, estructuras ausentes en esta carretera y que de acuerdo con el número de especies e individuos registrados convendría diseñar estratégicamente e implementar en zonas críticas como las que se señalan en este estudio para la mitigación de los atropellamientos de vida silvestre.

## **V. CONCLUSIÓN**

Nuestros resultados sugieren que las zonas más importantes de atropellamiento están asociadas a variables del sitio de estudio como: el dosel arbóreo, presión barométrica, pendiente y a la presencia de cuerpos de agua y, que la abundancia de organismos atropellados puede variar a lo largo de las temporadas del año. Además, las actividades humanas demostraron tener una relación con la muerte de anfibios y reptiles aumentando el número de atropellamientos.

Generalmente, para la protección y conservación de fauna silvestre se proponen cercas de conducción hacia pasos de fauna para evitar las muertes por atropellamiento, sin embargo, para este estudio y de acuerdo con las características observadas en las zonas críticas, también es importante la adopción de nuevas dinámicas socioeconómicas a largo plazo e implementar programas de restauración de las zonas perturbadas.

## VI. REFERENCIAS

- Aldrich M., Bubb P., Hostettler S. & van de Wiel H. (2000). *Bosques nublados tropicales montanos, Tiempos para la acción*. WWF International/IUCN.
- Amphibiaweb. (2022). *Meet amphibians*. Recuperado de: [https://amphibiaweb.org/amphibian/amph\\_index.html](https://amphibiaweb.org/amphibian/amph_index.html)
- Andrew, K.M. & Gibbons, J.W. 2005. How do highways influence snake movement? Behavioral responses to roads and vehicles. *Copeia Ichthyology and herpetology*, (4): 772–782. doi: [https://doi.org/10.1643/0045-8511\(2005\)005\[0772:HDHISM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1643/0045-8511(2005)005[0772:HDHISM]2.0.CO;2)
- Andrews, K. M., Gibbons, J. W., Jochimsen, D. M., & Mitchell, J. (2008). Ecological effects of roads on amphibians and reptiles: a literature review. *Herpetological Conservation*, 3, 121-143.
- Arreortúa, M., Flores, C. A., Simón-Salvador, P. R., Santiago-Dionicio, H., & González-Bernal, E. (2021). Description of the tadpole and natural history notes of *Incilius spiculatus* (Mendelson, 1997), an Endangered toad endemic to the Sierra Madre de Oaxaca, Mexico. *Amphibian & reptile conservation*, 15(2), 31-39.
- Ayob, N., Mustapha, M.A., Senawi, J. and Ahmad, N. (2020). Herpetofauna roadkills on Langkawi island, peninsular Malaysia: the influence of landscape and season on mortality distribution. *Sains Malaysiana* 49:10, 2373-2382. doi: <http://dx.doi.org/10.17576/jsm-2020-4910-04>
- Beebee, T. J., & Griffiths, R. A. (2005). The amphibian decline crisis: a watershed for conservation biology?. *Biological conservation*, 125(3), 271-285. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2005.04.009>
- Beebee, TJC. (2013). Effects of road mortality and mitigation measures an amphibian population. *Conservation Biology*, 00(0), 1-12. doi: [10.1111/cobi.12063](https://doi.org/10.1111/cobi.12063)
- Benítez, J.A. y Escalona-Segura, G. (2021). *Impacto de las vías de comunicación sobre la fauna silvestre en áreas protegidas; estudios de caso para el sureste de México*. El Colegio de la Frontera Sur.
- Benítez, J.A., Alexander, Shelley, M., Pozo-Montuy, G. y Sánchez-Acuña. (2021). *Vías de comunicación terrestre vs. Fauna: la experiencia global*. Impacto de las vías de comunicación sobre la fauna silvestre en áreas protegidas; estudios de caso para el sureste de México. Pág. 23-60.
- Brzezinski, M, Eliava, G. & Zmihoski, M. (2012). Road mortality of pond-breeding amphibians during spring migrations in the Mazurian Lakeland, NE Poland. *Eur J Wild Res*, 58. 685-693. doi: [10.1007/s10344-012-0618-2](https://doi.org/10.1007/s10344-012-0618-2)

- Burnham, K. P., & Anderson, D. R. (1998). *Practical use of the information-theoretic approach*. In Model selection and inference (pp. 75-117). Springer, New York, NY.
- Campbell, J.A. & Duellman, W.E. (2000). *New species of stream-breeding hylid frogs from the northern versant of the highlands of Oaxaca, Mexico*. Natural history museum. The University of Kansas. Pag. 4.
- Canal, D., Camacho, C., Martín, B., de Lucas, M. & Ferrer, M. (2018). Magnitude, composition and spatiotemporal patterns of vertebrate roadkill at regional scales: a study in southern Spain. *Animal biodiversity and conservation*, 41(2), 281-300. doi: [10.32800/abc.2018.41.0281](https://doi.org/10.32800/abc.2018.41.0281)
- Carr, L.W., Fahrig, L. (2001). Effect of rRoad tTraffic in tTwo aAmphibian sSpecies of dDifferent vVagility. *Conservation bBiology*, 15(4). 1071-1078. doi: [10.1046/j.1523-1739.2001.0150041071.x](https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2001.0150041071.x)
- Central Intelligence Agency (CIA). (2020). *The CIA world factbook 2020-2021*. Washington, DC: Central Intelligence Agency. Disponible en: <https://www.cia.gov/library/publications/resources/the-world-factbook/index.html>
- Ciocheti, G., de Assis, J. C., Ribeiro, J. W., & Ribeiro, M. C. (2017). Highway widening and underpass effects on vertebrate road mortality. *Biotropica*, 49(6), 765-769.
- Clevenger, AP, Chruszcz, B. y Gunson, KE (2003). Spatial patterns and factors influencing small vertebrate fauna road-kill aggregations. *Biological Conservation* 109, 15–26. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(02\)00127-1](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(02)00127-1)
- Comisión Nacional Forestal (27 de marzo de 2018). *Un paraíso en buenas manos. (Bienes Comunes de Santiago Comaltepec en Oaxaca, una comunidad que bien podría ser un paraíso)*. Recuperado en <https://cutt.ly/IedrC81>
- CONAGUA, 2010. Comisión Nacional del Agua, México. Normales climatológica por Estado. Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=oax>
- Cruz-Elizalde, R., Ochoa-Ochoa, L. M., Flores-Villela, O. A., & Velasco, J. A. (2022). Taxonomic distinctiveness and phylogenetic variability of amphibians and reptiles in the cloud forest of Mexico. *Community ecology*, 23(1), 87-102.
- Cushman, S.A. (2005). Effects of habitat loss and fragmentation on amphibians: A review and prospectus. *Biological conservation* 128, 231-240. doi: [10.1016/j.biocon.2005.09.031](https://doi.org/10.1016/j.biocon.2005.09.031)
- D'Amico, M., Román, J., De los Reyes, L., & Revilla, E. (2015). Vertebrate road-kill patterns in mediterranean habitats: who, when and where. *Biological conservation*, 191, 234-242.

- Das, A., M.F. Ahmed, B.P. Lahkar & P. Sharma (2007). A preliminary report of reptilian mortality on road due to vehicular movement near Kaziranga National Park, Assam, India. *Zoos' Print Journal* 22(7), 2742–2744. doi: [10.11609/JoTT.ZPJ.1541.2742-4](https://doi.org/10.11609/JoTT.ZPJ.1541.2742-4)
- Dornas, R., Teixeira, F., Gonsioroski, G., Nóbrega, R. (2019). Strain by the train: Patterns of toad fatalities on a Brazilian Amazonian railroad. *Science of the total environment*, 493-500. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.371>
- Duellman, W. E. (Ed.). (1999). Patterns of distribution of amphibians: a global perspective. *JHU Press*.
- Dulac, J. (2013). *Global land transport infrastructure requirements: estimating road and railway infrastructure capacity and costs to 2050*. International Energy Agency, Paris.
- Ficelota, F.G. (2015). Habitat Conservation research for amphibians: methodological improvements and thematic shifts. *Biodiversity and Conservation*, 24, 1293-1310. doi: 10.1007/s10531-015-0869-9
- Gao, B. C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote sensing of environment*, 58(3), 257-266.
- Gerhardt, H. C., & Klump, G. M. (1988). Masking of acoustic signals by the chorus background noise in the green tree frog: A limitation on mate choice. *Animal behaviour*, 36(4), 1247–1249. doi: [https://doi.org/10.1016/S0003-3472\(88\)80090-3](https://doi.org/10.1016/S0003-3472(88)80090-3)
- Glista, D.J., De Vault, T.L., Dawood, J.A. (2008). Vertebrate road mortality predominantly impacts amphibians. *Herpetological conservation and biology*, 3(1), 77-87. doi: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.11.001>
- Glista, D.J., De Vault, T.L., Dawood, J.A. (2009). A review of mitigation measures for reducing wildlife mortality on roadways. *Landscape and urban planning* 91, 1-7. doi: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.11.001>
- Gonçalves, J., Honrado, J. P., Vicente, J. R., & Civantos, E. (2016). A model-based framework for assessing the vulnerability of low dispersal vertebrates to landscape fragmentation under environmental change. *Ecological complexity*, 28, 174-186. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2016.05.003>
- González-Gallina A. & Benítez-Badillo G. (2013). Road Ecology studies for Mexico: a review. *Oecologia australis*, 17(1). 175-190. doi: <http://dx.doi.org/10.4257/oeco.2013.1701.14>
- González-Gallina, A. y Téllez-Torres, J.G. 2021. Medidas de mitigación para la fauna silvestre aplicables a la construcción de carreteras en áreas naturales protegidas. *Impacto de las vías de comunicación*

- sobre la fauna silvestre en áreas protegidas; estudios de caso para el sureste de México. Pág. 411-449.
- Greeff, J. M., & Whiting, M. J. (2000). Foraging-mode plasticity in the lizard *Platysaurus broadleyi*. *Herpetologica*, 402-407.
- Gual-Díaz, M. & Rendón-Correa, A. (comps.). 2014. *Bosques mesófilos de montaña de México: diversidad, ecología y manejo*. México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 352 pp.
- Gual-Díaz, M., & Rendón-Correa, A. (2017). México's mountain mesophyll forests. *Agroproductividad*, 10(1), 3-9.
- Harvey Pough, F. (2007). Amphibian biology and husbandry. *ILAR journal*, 48(3), 203-213. doi: <https://doi.org/10.1093/ilar.48.3.203>
- Hastings, H., Barr, J., & Bateman, P. W. (2019). Spatial and temporal patterns of reptile roadkill in the north-west Australian tropics. *Pacific conservation biology*, 25(4), 370-376.
- Hearnden, M. N. (1991). The reproductive and larval ecology of *Bufo marinus* (Anura: Bufonidae) [Doctoral dissertation, James Cook University of North Queensland].
- Heigl, F., Horvath, K., Lahad, G. y Zeller, J. (2017). Amphibian and reptile road-kills on tertiary roads in relation to landscape structure: using a citizen science approach with open-access land cover data. *BMC Ecology*, 17-24. doi: 10.1186/s12898-017-0134-z
- Hels, T., & Buchwald, E. (2001). The effect of road kills on amphibian populations. *Biological conservation*, 99(3), 331-340.
- Heyer, W., Donnelly, M., McDiarmid, R., Hayek, L. & Foster, M. (1994). *Measuring and monitoring biological diversity: Standard methods for amphibians*. Smithsonian Institution Press, Washington, DC. 364 pp.
- Hillyard, S.D. (1999). Behavioral, molecular and integrative mechanisms of amphibian osmoregulation. *Journal of experimental zoology*, 283(7), 662-674. doi: 10.1002/(sici)1097-010x(19990601)283:7<662::aid-jez5>3.0.co;2-1
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2015). Guía para la interpretación de cartografía: Uso del suelo y vegetación. Escala 1:250,000, Serie V.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2021). Cuentas de los ecosistemas de México. Resultados del proyecto natural capital accounting and valuation of ecosystem services (NCAVES). México, INEGI, 258 pp

- Jacobson, S. L. (2005). Mitigation measures for highway-caused impacts to birds. In In: Ralph, C. John; Rich, Terrell D., editors 2005. Bird Conservation Implementation and Integration in the Americas: Proceedings of the Third International Partners in Flight Conference. 2002 March 20-24; Asilomar, California, Volume 2 Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-191. Albany, CA: US Dept. of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station: p. 1043-1050 (Vol. 191).
- Karanasios, P., Wunderlich, R. F., Mukhtar, H., Chiu, H. W., & Lin, Y. P. (2021). Exploring hybrid consensus models to assess roadkill. *Journal of Environmental Management*, 294, 112886.
- Kim, S. J. (1992). The metrically trimmed mean as a robust estimator of location. *The Annals of Statistics*, 20(3), 1534-1547.
- Kindlmann, P., & Burel, F. (2008). Connectivity measures: a review. *Landscape ecology*, 23(8), 879-890.
- Kriegler, F. J., Malila, W. A., Nalepka, R. F., & Richardson, W. (1969). Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition. *Remote sensing of environment*, VI, 97.
- Lande, R. (1998). Genetics and demography in biological conservation. *Science*, 241, 1455-1460. doi: [10.1126/science.3420403](https://doi.org/10.1126/science.3420403)
- Lowe W.H. (2009). What drives long-distance dispersal? A test of theoretical predictions. *Ecology* 90(6):1456–1462. Recuperado de <https://n9.cl/mj0k>
- Main, M.B. and Allen, G.M. (2002). Landscape and seasonal influences on roadkill of wildlife in southwest Florida. *Florida Scientist*, 65(3), 149-158. <http://www.jstor.org/stable/24321009>.
- Martin, T. E., Jones, S. E., Creedy, T. J., Hoskins, H. M., McCann, N. P., Batke, S. P. & Jocqué, M. (2021). A review of the ecological value of Cusuco National Park: an urgent call for conservation action in a highly threatened Mesoamerican cloud forest. *Journal of Mesoamerican Biology*, 1(1), 6-50.
- Mazerolle, M. 2004. Amphibian road mortality in response to nightly variations in traffic intensity. *Herpetologica*, 60(1). 45-53. doi <https://doi.org/10.1655/02-109>
- Mazerolle, M.J., Hout, M., Gravel, M. (2005). Behavior of Amphibians on the Road in Response to Car Traffic. *Herpetologica* 61(4). 380-388. doi: <https://doi.org/10.1655/04-79.1>
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International journal of remote sensing*, 17(7), 1425-1432.
- Medrano-Vizcaíno, P., & Espinosa, S. (2021). Geography of roadkills within the Tropical Andes Biodiversity Hotspot: Poorly known vertebrates are part of the toll. *Biotropica*, 53(3), 820-830.

- Mims, M.C., Phillipsen, I.C., Lyle, D.A., Kirk, E.E. and Olden, J.D. (2015). Ecological strategies predict associations between aquatic and genetic connectivity for dryland amphibians. *Ecological society of America*. 96:5, 1371-1382. doi: <https://doi.org/10.1890/14-0490.1>
- Monroy, M. C. (2015). Tasa de atropellamiento de fauna silvestre en la vía San Onofre-María la Baja, caribe colombiano. *Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas*, 27, pp. 88-95.
- Morelle, K, Lehaire, F. & Lejeune P. (2013). Spatio-temporal patterns of wildlife-vehicle collisions in a region with a high-density road network. *Nature conservation*, 5, 53-57. doi: 10.3897/natureconservation.5.4634
- Muñoz-Villers, L. E., & López-Blanco, J. (2008). Land use/cover changes using Landsat TM/ETM images in a tropical and biodiverse mountainous area of central-eastern Mexico. *International Journal of Remote Sensing*, 29(1), 71-93.
- Nahuat-Cervera, P.E., González-Gallina, A., Avilés-Novelo, J.R. y Cedeño-Vásquez, J.R. (2021). Atropellamiento de vertebrados en la carretera Kinchil-Celestún, Yucatán. Colegio de la frontera Sur. Impacto de las vías de comunicación sobre la fauna silvestre en áreas naturales protegidas: estudios de caso para el sureste de México. Pág. 379-392.
- Norma Oficial Mexicana 059. (2010). *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN. Estados Unidos Mexicanos.
- Ortiz-Pérez, M.A., Hernández-Santana J.R. y Figueroa-Mah Eng J.M. (2004). *Reconocimiento fisiográfico y geomorfológico. Biodiversidad de Oaxaca*. México, D.F.: Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México-Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza-World Wildlife Found, 43p
- Parastatidis, D., Mitraka, Z., Chrysoulakis, N., & Abrams, M. (2017). Online global land surface temperature estimation from Landsat. *Remote sensing*, 9(12), 1208.
- Petrovan, S., y Schmidt, B. (2019). Neglected juveniles; a call for integrating all amphibian life in assessments of mitigation success (and how to do it). *Biological Conservation*, 236, 252-260. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.05.023>
- Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J. M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in ecology & evolution*, 20(9), 503-510.

- Pinto, F., Clevenger, A. y Grillo, C. (2020). Effects of roads on terrestrial vertebrate species in Latin America. *Environmental Impact Assessment Review* 81, 1-8. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2019.106337>
- Prediction Of Worldwide Energy Resources. (2022). *POWER Project's version V2.0.0. NASA Earth Science/Applied Science Program*. Accessed 2022/04/05. Database accessible at <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Sales, R. F., & Freire, E. M. (2015). Diet and foraging behavior of *Ameivula ocellifera* (Squamata: Teiidae) in the Brazilian semiarid Caatinga. *Journal of Herpetology*, 49(4), 579-585.
- Sánchez-Acuña M. & Benítez, J.A. (2021). Mortalidad de fauna por atropello sobre la carretera 186, en las reservas de Calakmul y Balam-kú, Campeche, México. *Impacto de las vías de comunicación sobre la fauna silvestre en áreas protegidas; estudios de caso para el sureste de México*. Pág. 273-303.
- Santiago Comaltepec. (2011). *Plan municipal de desarrollo. Honorable ayuntamiento municipal constitucional*. Oaxaca, México. 18-19. Recuperado de <http://cort.as/-SeQI>
- Saunders, D. A., Hobbs, R. J., & Margules, C. R. (1991). Biological consequences of ecosystem fragmentation: a review. *Conservation biology*, 5(1), 18-32.
- Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT). (2020). *Datos viales*. Pág. 783. [https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Datos-Viales-2020/20\\_OAX\\_DV2020.pdf](https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Datos-Viales-2020/20_OAX_DV2020.pdf)
- Seijas, A. E., Araujo-Quintero, A., & Velásquez, N. (2013). Mortalidad de vertebrados en la carretera Guanare-Guanarito, estado Portuguesa, Venezuela. *Biología tropical*, 61(4), 1619-1636.
- Selvan, K. M., Sridharan, N., & John, S. (2012). Roadkill animals on national highways of Karnataka, India. *Journal of eEcology and the nNatural eEnvironment*, 4(14), 363-365.
- Seo, C., Thorne, J. H., Choi, T., Kwon, H., & Park, C. H. (2015). Disentangling roadkill: the influence of landscape and season on cumulative vertebrate mortality in South Korea. *Landscape and ecological engineering*, 11(1), 87-99.
- Simón-Salvador, P. R., M. Arreortúa, C. A. Flores, H. Santiago-Dionicio, and E. González-Bernal. 2021. The role of Indigenous and Community Conservation Areas in herpetofauna conservation: a preliminary list for Santa Cruz Tepetotutla, Oaxaca México. *ZooKeys* 1029: 185–208. <https://doi.org/10.3897/zookeys.1029.62205>

- Snyder, G. K., & Weathers, W. W. (1975). Temperature adaptations in amphibians. *The American Naturalist*, 109(965), 93-101.
- Sousa-Guedes, D., Franch, M., Sillero, N. 2021. A spatial approach for modeling amphibians road-kills: comparison of regression techniques. *Geo-Information*, 10(5). doi: <https://doi.org/10.3390/ijgi10050343>
- Steelman, C.K. & Dorcas, M.E. (2010). Anuran calling survey optimization: developing and testing predictive models of anuran calling activity. *Journal of herpetology*, 44(1), 61-68. doi: <https://doi.org/10.1670/08-329.1>
- Taloor, A. K., Manhas, D. S., & Kothiyari, G. C. (2021). Retrieval of land surface temperature, normalized difference moisture index, normalized difference water index of the Ravi basin using Landsat data. *Applied Computing and Geosciences*, 9, 100051.
- Tobar-Suárez, C., N. Urbina-Cardona, F. Villalobos, and E. Pineda. 2021. Amphibian species richness and endemism in tropical montane cloud forests across the Neotropics. *Biodiversity and Conservation* 31:295–313.
- Toledo-Aceves, T., Meave, J. A., González-Espinosa, M., & Ramírez-Marcial, N. (2011). Tropical montane cloud forests: current threats and opportunities for their conservation and sustainable management in Mexico. *Journal of environmental management*, 92(3), 974-981.
- Touzot, M., Lengagne, T., Secondi, J., Desouhant, E., Théry, M., Dumet, A., Duchamp, C. and Mondy. (2020). Artificial light at night alters the sexual behaviour and fertilisation success of the common toad. *Environmental pollution*, 259, 1-7. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113883>
- Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. (2019). *The IUCN Red List of Threatened Species*. Versión 2019-2. Recuperado de <https://cutt.ly/6edr2x1>
- Vijayakumar, S. P., Vasudevan, K., & Ishwar, N. M. (2001). Herpetofaunal mortality on roads in the Anamalai Hills, southern Western Ghats. *Hamadryad-Madras*, 26, 253-260.
- Wells, K.D. (2007). Chapter 6: Movements and orientation. In; *The Ecology and Behavior of Amphibians*. (pp230- 232). The University of Chicago Press.
- Welsh, A. H. (1987). The trimmed mean in the linear model. *The Annals of Statistics*, 15(1), 20-36.
- Zambrano, J., Coates, R., & Howe, H. F. (2014). Effects of forest fragmentation on the recruitment success of the tropical tree *Poulsenia armata* at Los Tuxtlas, Veracruz, Mexico. *Journal of Tropical Ecology*, 30(3), 209-218.

Zhang, W., Shu, G., Li, Y., Xiong, S., Liang, C., & Li, C. (2018). Daytime driving decreases amphibian roadkill. *PeerJ*, 6, e5385.