



Universidad Autónoma del Estado de México



Facultad de Ciencias

**Efectos de la actividad minera en *Sceloporus aeneus*
(Squamata: Phrynosomatidae): relación entre el verdor
del paisaje y los perfiles leucocitarios**

TESIS

Presenta:

Evelyn Carolina Alegría Hernández

Asesor de tesis:

Dr. Oswaldo Hernández Gallegos

Co-asesor:

Dr. Daniel Sánchez Manjarrez

Toluca, Estado de México, 26 marzo 2026

ÍNDICE	
RESUMEN	1
AGRADECIMIENTOS.....	3
INTRODUCCIÓN	5
Análisis sanguíneo	5
Efectos del estrés	7
Impacto ambiental y fragmentación del hábitat	7
ANTECEDENTES.....	10
JUSTIFICACIÓN.....	16
HIPÓTESIS.....	18
OBJETIVOS	19
General.....	19
Particulares	19
MATERIALES Y MÉTODOS.....	20
Especie bajo estudio	20
Área de estudio	21
Trabajo en campo	22
Análisis de datos.....	25
Morfometría.....	26
Análisis estadísticos.....	26

Análisis del verdor de las áreas de estudio	27
RESULTADOS.....	29
Muestreo	29
Morfometría leucocitaria	29
Perfiles leucocitarios y proporciones H/L	33
Análisis del verdor de las áreas de estudio	41
DISCUSIÓN	43
Morfometría leucocitaria	43
Variación del perfil leucocitario y su relación con la calidad del hábitat	43
Efectos de la minería y uso de hábitat	49
CONCLUSIONES	53
BIBLIOGRAFÍA	55

RESUMEN

La actividad minera representa una fuente importante de degradación ambiental, la cual puede generar modificaciones en el paisaje y la fisiología de los organismos que habitan en zonas afectadas. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar los efectos de la actividad minera en *Sceloporus aeneus* (Squamata: Phrynosomatidae), mediante el análisis de la relación entre el verdor del paisaje y los perfiles leucocitarios como indicadores del estado del hábitat y el nivel de estrés en dos poblaciones del municipio de Calimaya, Estado de México: una ubicada en una zona con actividad minera y otra en un área relativamente conservada.

Se recolectaron muestras sanguíneas de individuos de *S. aeneus* siguiendo procedimientos estandarizados, a partir de las cuales se realizaron frotis sanguíneos para la identificación, cuantificación y medición morfométrica de las células leucocitarias. Se obtuvo y comparó la proporción de Heterófilos/Linfocitos (H/L) como un indicador fisiológico asociado al estrés. Asimismo, se analizó la degradación ambiental de ambas localidades mediante imágenes satelitales, con el fin de estimar el verdor del paisaje y evaluar su relación con los perfiles leucocitarios observados.

Los resultados mostraron diferencias en los perfiles leucocitarios entre las poblaciones analizadas, particularmente en la proporción H/L, lo que sugiere variaciones en el nivel de estrés fisiológico asociadas a las condiciones ambientales. En donde la población de “La Mina” presentó valores más elevados de esta proporción en comparación con el sitio “La Cruz”. El análisis del verdor del paisaje evidenció contrastes en el grado de cobertura vegetal

entre las zonas con y sin actividad minera, los cuales se relacionaron con los patrones hematológicos registrados.

INTRODUCCIÓN

Análisis sanguíneo

La sangre es el fluido más importante del cuerpo humano, entre sus funciones, están las de transportar oxígeno, nutrientes y desechos metabólicos, también es responsable de las respuestas inmunológicas (Martín-Velasco y Carón, 2007). En reptiles, al igual que en el resto de los vertebrados, resulta muy útil la evaluación sanguínea, ya que la morfología en conjunto con las proporciones de los eritrocitos y los leucocitos pueden diferir entre estados fisiológicos como la edad, sexo, periodo reproductor, nutrición, parasitosis, enfermedades inflamatorias y cuadros patológicos. Además, también pueden existir variaciones debido a factores ecológicos como la altitud, hábitat y estación del año (Mendoza et al., 2011).

En vertebrados, las células leucocitarias se clasifican en granulocitos y agranulocitos, incluyendo neutrófilos, eosinófilos, basófilos, linfocitos y monocitos, los cuales participan en la respuesta inmune innata y adaptativa (González-Pardo et al., 2023). En reptiles, como *Sceloporus aeneus*, los heterófilos son funcionalmente análogos a los neutrófilos de los mamíferos, ya que participan en la fagocitosis y en la respuesta inflamatoria; sin embargo, presentan diferencias en sus mecanismos efectores, mostrando una menor actividad oxidativa y una mayor dependencia de enzimas contenidas en sus gránulos. Asimismo, las diferencias en la afinidad tintorial entre neutrófilos y heterófilos se deben a la composición de sus gránulos citoplasmáticos, los cuales en los heterófilos presentan una mayor afinidad por colorantes ácidos, otorgándoles su característica coloración eosinofílica (Campbell, 2004). Asimismo, en reptiles pueden presentarse azurófilos, considerados una variante de monocitos o una población intermedia con funciones relacionadas con la fagocitosis. Por otro lado, a

diferencia de los mamíferos, los eritrocitos en reptiles son nucleados, lo cual se relaciona con características evolutivas y fisiológicas que permiten mantener funciones celulares adicionales, aunque con menor capacidad de deformación y transporte eficiente de oxígeno en comparación con eritrocitos anucleados, siendo todo lo anterior característicos de los saurópsidos (Campbell, 2004; Stacy et al., 2011).

Por lo cual mediante el conteo y posterior análisis de las proporciones de glóbulos blancos en la sangre de reptiles, se pueden determinar las alteraciones en las abundancias celulares que actúan como indicadores de estrés causado por distintos factores. El perfil leucocitario es un método utilizado con frecuencia debido a la valiosa información clínica que proporciona. Entre sus principales ventajas se encuentran la posibilidad de contar con un mayor tiempo para la obtención de muestras sanguíneas (particularmente en ectotermos), su bajo costo y la viabilidad de trabajar con animales de talla pequeña (Davis et al., 2008). En comparación con otros indicadores fisiológicos, como los parámetros bioquímicos sanguíneos (por ejemplo, corticosterona), los marcadores moleculares o los análisis histopatológicos, el perfil leucocitario requiere un menor volumen de muestra, implica procedimientos menos invasivos y resulta más accesible para estudios de campo (Romero y Reed, 2005). Gracias a estas características, los perfiles leucocitarios se han incorporado como biomarcadores útiles para evaluar la salud de los individuos y de su ambiente (González-Pardo et al., 2024). Específicamente han tenido éxito como indicadores de estrés en poblaciones en ambientes perturbados y alteraciones morfológicas (Davis et al., 2008).

Efectos del estrés

El estrés se considera una reacción de alarma, que activa un conjunto de reacciones que implican respuestas conductuales y fisiológicas (neuronales, metabólicas y neuroendócrinas) que permiten al organismo responder al factor estresante de forma funcional y regulada (Duval et al., 2010). Los reptiles al experimentar estrés, activan respuestas fisiológicas similares a las de otros vertebrados, se activa el eje hipotálamo-pituitaria-adrenal (HPA) y el sistema nervioso simpático, lo que lleva a la liberación de hormonas como los glucocorticoides, el cortisol en la mayoría de los vertebrados y la corticosterona en reptiles (Ortega Planell y Suárez, 2013), así mismo se liberan catecolaminas (adrenalina y noradrenalina), las cuales tienen efectos directos e indirectos sobre la abundancia de leucocitos (Duval et al., 2010), por lo que es posible que el estrés se pueda ver reflejado en la proporción de glóbulos blancos dado que el sistema inmunológico y el sistema nervioso están vinculados a través de vías neuroendócrinas (Treviño-Alanis y Jaramillo-González, 2005).

Impacto ambiental y fragmentación del hábitat

La extracción de materiales aluviales afecta negativamente a la fauna silvestre que habita en zonas donde se desarrollan actividades mineras, ya que provoca la eliminación de la vegetación y la alteración de la cobertura del suelo, además de generar distintos tipos de contaminación (Valderrama, 1992). Esta fragmentación del hábitat y la modificación de la estructura vegetal obligan a las especies a desplazarse hacia otras áreas y las exponen a cambios microambientales abruptos (Peña-Becerril et al., 2005).

El Estado de México, a pesar de representar aproximadamente el 1.1 % del territorio nacional, posee una alta diversidad biológica, debido a la presencia de una amplia variedad de ecosistemas que van desde bosques templados hasta zonas semiáridas, lo que favorece una elevada riqueza de especies de flora y fauna (Secretaría del Medio Ambiente, 2007). Además, cuenta con distintas características climáticas, geomorfológicas, geológicas, edafológicas y biogeográficas que favorecen la distribución de una gran diversidad de especies. Sin embargo, la biodiversidad se ha visto afectada por la degradación ambiental causada principalmente por actividades antropogénicas como: la urbanización, la contaminación, la práctica de monocultivos, la caza, captura y colecta ilegal de especies silvestres, la actividad minera, entre otras (Secretaría del Medio Ambiente, 2007).

Una de las zonas que se ve afectada, específicamente por la actividad minera es el Municipio de Calimaya, donde existe un enorme deterioro y pérdida de la capa de suelo fértil y vegetación. Se ha observado el uso de los ecosistemas como espacios mineros y como vertederos de basura, lo que se relaciona con la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, emisión atmosférica de partículas suspendidas y emisión de ruido (Valencia García et al., 2022). La fragmentación y pérdida del hábitat actúan de manera particular sobre cada especie (Pineda y Halffter, 2004). La respuesta a los cambios en el hábitat depende de los atributos de las especies, como movilidad, ámbito hogareño, fisiología, microhábitat, alimentación y a las condiciones climáticas (Burke y Gibbons, 1995). Las respuestas identificadas ante la perturbación del hábitat pueden ser: positivas, negativas o neutras (Suazo-Ortuño et al., 2008).

Se ha observado un notable declive en muchas poblaciones de reptiles; además, estos cambios incrementan su vulnerabilidad frente a los depredadores y reducen la disponibilidad

de refugios, lo que afecta su supervivencia y persistencia poblacional (Todd et al., 2010). En este sentido, las modificaciones del ambiente pueden obligar a las especies a aumentar la frecuencia en el uso de sus estrategias antidepredatorias. Sin embargo, dado que dichas estrategias implican un alto costo energético, pueden provocar una disminución en la condición corporal y promover estados de estrés (Amo de Paz, 2005).

ANTECEDENTES

La degradación del suelo influye directamente en la pérdida de cobertura vegetal y, por ende, en el descenso de los valores de verdor registrados mediante índices como el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Según González Pérez et al. (2012), el análisis fisiográfico permite identificar zonas críticas donde los procesos de erosión y degradación han modificado significativamente la vegetación original, lo que repercute en la funcionalidad ecológica de la zona. Estos enfoques permiten contextualizar la disminución del verdor como resultado de presiones antrópicas y cambios en el uso de suelo.

La conectividad funcional del paisaje, entendida como la capacidad de un entorno para facilitar o limitar el desplazamiento de los organismos, es un factor clave para la persistencia de las poblaciones. Diversas actividades antropogénicas, como la urbanización, la agricultura y la construcción de infraestructura, pueden reducir dicha conectividad, afectando de manera particular a especies con baja vagilidad, como las lagartijas. En este contexto, el estudio de Romero-Báez et al. (2024) realizado con *Sceloporus grammicus* ha demostrado que, a pesar de su limitada capacidad de dispersión, la especie puede mantener conectividad funcional a través de paisajes modificados, dependiendo de ciertas características ambientales. Factores como la temperatura del sustrato y del aire, así como la cobertura agrícola, influyen positivamente en el movimiento y el flujo génico, mientras que otros elementos del paisaje pueden limitar o condicionar su desplazamiento. Estos resultados sugieren que las lagartijas del género *Sceloporus* responden de manera sensible a la estructura del paisaje y a las condiciones microambientales, alternando estrategias de uso del hábitat en función de la distancia y el grado de perturbación. Este tipo de evidencia resalta la importancia de evaluar la conectividad y la calidad del hábitat en paisajes antropizados, ya que los cambios en la

cobertura del suelo pueden tener implicaciones directas sobre la distribución, la dinámica poblacional y el estado fisiológico de las especies.

El territorio municipal de Calimaya cuenta con bosques de coníferas, bosques de encinos, pastizales y paisajes agrícolas con asentamientos humanos urbanos. Sin embargo, a partir del año 2010, los procesos de cambio de uso del suelo han ocurrido con mayor frecuencia e intensidad. En este sentido, la expansión del espacio agrícola, el pastoreo, la extracción de recursos pétreos (actividad minera) y satisfacer la demanda de vivienda en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, son los factores asociados con el aprovechamiento actual del suelo, y por supuesto, con los procesos de cambio e impactos ambientales (Valencia García et al., 2016).

Se ha documentado una respuesta negativa en la abundancia de las poblaciones de lagartijas ante la modificación del hábitat. El fuerte impacto negativo de la minería en las poblaciones de reptiles refleja el hecho de que la minería a cielo abierto o “de superficie” invariablemente resulta en la destrucción completa del hábitat en el área minada, provocando la disminución de poblaciones de lagartijas (Doherty et al., 2020).

Mayani-Parás et al. (2019) evaluaron el impacto de la pérdida de hábitat y la actividad minera sobre la distribución potencial de 179 especies endémicas de anfibios y reptiles en México mediante modelos de nicho ecológico. Sus resultados muestran que el efecto combinado de ambas perturbaciones es considerablemente mayor que el de la pérdida de hábitat por sí sola, provocando reducciones importantes en la distribución de numerosas especies. Además, la fragmentación del paisaje incrementó el número de parches necesarios para conservar una proporción mínima de las distribuciones actuales, lo que podría favorecer la extirpación de poblaciones locales. Estos hallazgos destacan que la minería, en conjunto con la

transformación del hábitat, representa una amenaza significativa para la persistencia de especies herpetológicas endémicas y vulnerables en México.

Como parte de los cambios ambientales actuales, la temperatura ambiental también influye en diversos procesos fisiológicos de los organismos, incluyendo aquéllos relacionados con el sistema inmunológico. En reptiles, las variaciones térmicas pueden afectar parámetros hematológicos y la respuesta inmune. En este contexto, Blázquez-Castro et al. (2026) realizaron un estudio en dos especies de lagartijas mediterráneas para evaluar cómo las olas de calor y las condiciones del microhábitat influyen en su fisiología. Los autores encontraron que las variaciones en temperatura y humedad ambiental pueden asociarse con cambios en el número de leucocitos circulantes, lo que sugiere que el estrés térmico puede afectar componentes del sistema inmunológico en estos organismos.

Otro factor que genera un impacto negativo en el hábitat de las especies es el uso de vehículos todo terreno. Existen estudios donde se han analizado los efectos de dichos vehículos sobre la abundancia de especies vegetales y animales. Se ha observado que su uso puede tener una influencia visible en el paisaje provocando compactación del suelo, aumento de la erosión eólica e hídrica, y alteración de la vegetación (Tull y Brussard, 2007). Podría decirse que estas influencias en el ambiente constituyen mayor estrés en las poblaciones de plantas y animales que habitan sitios donde transitan vehículos todo terreno, lo que resulta en inestabilidad del desarrollo en dichas poblaciones. Por ejemplo, en la lagartija *Sceloporus occidentalis*, mediante asimetría fluctuante, se concluyó que las poblaciones que se encuentran en áreas de uso intensivo de vehículos todo terreno son expuestas a niveles más altos de estrés que en las poblaciones en las que no se utilizan vehículos todo terreno (Tull y Brussard, 2007).

De igual manera, Motz et al. (2014) trabajaron con la lagartija *S. occidentalis*, realizando perfiles leucocitarios para determinar diferencias en la cantidad o morfología de los leucocitos con especies infectadas con el parásito de la malaria, comparando la abundancia de cada clase de leucocitos (linfocitos, monocitos, heterófilos, eosinófilos y basófilos) en lagartijas infectadas y no infectadas. El estudio descubrió que el número de leucocitos y linfocitos por microlitro de sangre diferían significativamente, las hembras infectadas tenían un recuento de glóbulos blancos mayor que las lagartijas no infectadas, el aumento de los glóbulos blancos en su mayoría fue de linfocitos lo que se asocia con inflamación y patógenos intracelulares en reptiles, lo que apoya la teoría de que la infección, en este caso, con *Plasmodium mexicanum* estimula la respuesta inmune de la lagartija para aumentar los niveles de leucocitos.

En el estudio realizado por Sánchez-Manjarrez (2024) se determinaron los perfiles leucocitarios y la proporción heterófilo/linfocito de una comunidad de reptiles ubicada en El Cerrillo Piedras Blancas en el Estado de México, entre las cuales incluyó a la lagartija *Sceloporus grammicus*. En general, las abundancias resultantes de heterófilos y linfocitos que se observaron en la población estudiada, y mediante las proporciones H/ L, reflejaron distintos niveles de estrés en esta especie tomando en cuenta que para el cálculo de la proporción H/ L los valores cercanos o superiores a 1 reflejan un nivel considerable de estrés. Esta población de *S. grammicus* mostró un bajo nivel de estrés fisiológico durante la mayor parte del año, sin embargo, se observaron cambios a niveles moderados de estrés durante la primavera y el invierno. El autor menciona la posibilidad de que estos cambios en las abundancias se atribuyan al descenso de las temperaturas en la zona (invierno), y al período de nacimiento de crías (primavera), lo que puede explicar el aumento de los niveles de estrés

en estas temporadas debido a los costos energéticos. Es importante mencionar también que el bajo nivel de estrés fisiológico que presenta particularmente esta especie indica que tiene una gran diversidad de estrategias para adaptarse a cambios en su hábitat, permitiéndole a sus poblaciones una distribución más amplia en una gran variedad de ecosistemas, distribución latitudinal y altitudinal, incluyendo ambientes altamente antropizados mostrando una baja vulnerabilidad a la degradación ambiental. En ese mismo estudio, *Barisia imbricata* presentó niveles elevados de estrés fisiológico, particularmente durante el otoño y el invierno. Durante la temporada invernal se observó un incremento en la abundancia de heterófilos mayor a los linfocitos, reflejado en un aumento de la proporción H/L. Este patrón se asoció con los costos energéticos derivados de las bajas temperaturas y la escasez de alimento característica de la temporada invernal, así como con la temporada de preñez característica de la especie. Finalmente ese estudio destaca que en el resto de las especies de reptiles estudiadas se observaron valores moderados de la proporción H/L, es decir, no se observó un valor elevado de estrés, a pesar de esto, la prevalencia de estos valores en las proporciones leucocitarias a lo largo de un año si indicaría un proceso de estrés crónico en las poblaciones causado mayormente por los diferentes efectos de la antropización y las prácticas agrícolas del área en la que se realizó este estudio, lo que tiene impacto negativo en las comunidades de reptiles, como la fragmentación de la distribución de las especies.

Recientemente Andrade-Soto (en proceso) trabajó con análisis ecomorfológicos y realizó comparaciones entre tres sitios categorizados por su degradación ambiental de acuerdo con la vegetación existente, de los cuales se denominaron a los sitios “La Cruz”, “Cultivos” y “La Mina”, en esta última existe mayor degradación; cabe señalar que en las tres zonas habita *S. aeneus*. La intención del estudio fue averiguar si el deterioro de su hábitat influye de

manera directa sobre la morfología de los individuos, ya que se analizó tanto su morfometría geométrica así como datos de escutelación (para calcular los índices de asimetría). En sus resultados muestran que los individuos de *S. aeneus* tienden a reflejar, por medio de la asimetría fluctuante, el estrés ambiental al que están sometidos más que con los análisis de morfología geométrica. Los individuos de “La Mina” evidentemente presentaron índices de asimetría fluctuante elevados, en comparación con los de los otros sitios, donde al parecer el estrés ambiental es menor. Estos análisis sugieren que el estrés por degradación ambiental tiene efecto directo, en este caso, sobre caracteres escutelaes.

JUSTIFICACIÓN

El estudio del estado fisiológico de la fauna silvestre es fundamental para comprender los impactos que las actividades humanas generan en los ecosistemas. Los reptiles, son altamente sensibles a las alteraciones ambientales debido a su fisiología ectotérmica y a su estrecha dependencia de las condiciones ambientales (Bickford et al., 2010; Zimmerman et al., 2010).

La lagartija *S. aeneus* presenta una distribución geográfica limitada y ocupa relativamente pocos tipos de hábitat, lo que incrementa su vulnerabilidad ante alteraciones ambientales. Además, constituye un componente ecológico relevante dentro de los ecosistemas donde habita, por lo que cualquier afectación a sus poblaciones podría reflejar cambios ambientales significativos (Wilson et al., 2013). Asimismo, se trata de una especie con baja vagilidad, lo que limita su capacidad de desplazamiento ante cambios drásticos en su hábitat (Romero-Báez et al., 2024). Estas características, junto con su alto EVS (Environmental Vulnerability Score) (Wilson et al., 2013) la clasifican como una especie de prioridad de conservación nivel 1, y requiere atención inmediata en términos de monitoreo y protección (Díaz-Cárdenas et al., 2024).

Actualmente, no existen estudios enfocados en la salud inmunológica de *S. aeneus* y mucho menos que relacionen sus perfiles sanguíneos con gradientes de degradación ambiental en el Estado de México. En este contexto, un análisis detallado de los perfiles leucocitarios de esta especie permitiría identificar niveles de estrés y posibles alteraciones asociadas al deterioro del hábitat. A pesar de que diversos estudios han abordado la variación en parámetros hematológicos en reptiles desde un enfoque principalmente fisiológico, aún es limitada la información que vincula estos indicadores con factores ambientales en condiciones naturales en el Estado de México. Esta falta de integración entre la fisiología y el contexto ecológico,

dificulta la comprensión del efecto real de las perturbaciones antrópicas sobre los organismos. Por ello, el presente estudio busca evaluar la variación en los perfiles leucocitarios de *S. aeneus* en sitios con distinto grado de perturbación, con el fin de aportar evidencia sobre la relación entre el estado fisiológico y la calidad del hábitat.

HIPÓTESIS

Los individuos de *S. aeneus* que habitan en el sitio con actividad minera, presentarán diferencias en la proporción y/o morfometría de las células leucocitarias en comparación con los individuos de la población que habita en un sitio con menor perturbación ambiental, lo anterior, debido a la pérdida y alteración de la cobertura vegetal, así como a otros factores de estrés asociados a la actividad minera.

OBJETIVOS

General

- Determinar los efectos de la actividad minera en características ambientales y fisiológicas de *Sceloporus aeneus* en Calimaya, Estado de México.

Particulares

- Identificar y medir el tamaño de las células leucocitarias en individuos de *Sceloporus aeneus* para caracterizar su morfometría leucocitaria y evaluar posibles variaciones.
- Obtener y comparar la proporción de los heterófilos/linfocitos de *Sceloporus aeneus* en dos poblaciones, una con actividad minera y otra relativamente conservada.
- Determinar el nivel de estrés fisiológico de *Sceloporus aeneus* entre en dos poblaciones, una con actividad minera y otra relativamente conservada mediante el análisis de perfiles leucocitarios.
- Analizar las dos poblaciones de *Sceloporus aeneus* con diferente degradación ambiental mediante imágenes satelitales, con el fin de estimar el verdor del paisaje y su relación con los perfiles leucocitarios.

MATERIALES Y MÉTODOS

Especie bajo estudio

La lagartija *S. aeneus*, es una especie ovípara con actividad reproductora estacional en los meses de marzo a junio, las hembras y los machos maduran sexualmente cuando alcanzan los 45 mm de LHC, presenta dimorfismo sexual que se manifiesta en características morfométricas, los machos tienden a presentar valores mayores en la LHC, así como en la longitud y el ancho de la cabeza y la longitud de la cola, en comparación con las hembras; sin embargo, estas diferencias no siempre son marcadas y pueden variar entre poblaciones o a través del tiempo (Ramírez-Bautista et al., 2016), además los machos presentan polimorfismo que incluye distintas tonalidades azules, amarillas o naranjas en abdomen y con rayas muy delgadas de color negro en la zona gular (Manríquez-Morán et al., 2013; Hernández-Gallegos et al., 2014).

Habitan en zonas abiertas de pastizales alpinos, con presencia de pastos, bosques de pino, matorrales, áreas rocosas y fisuras (Canseco-Márquez et al., 2007). Es una especie endémica que se distribuye a lo largo de la Faja Volcánica Transmexicana, encontrándose en los Estados de Michoacán, Tlaxcala, Morelos, Puebla, Hidalgo, Querétaro, Estado de México y Ciudad de México; en altitudes que van desde los 1850 hasta los 3600 msnm (Ochoa-Ochoa et al., 2006; Canseco-Márquez et al., 2007).

En cuanto a su estado de conservación, en México, no se le incluye en la lista de especies protegidas (SEMARNAT, 2010). Dentro de la IUCN (International Union for Conservation of Nature) se clasifica como especie LC (Least Concern / Preocupación menor), lo que significa que actualmente no se considera en riesgo de extinción a nivel global (IUCN, 2007).

Sin embargo, dentro del EVS (Environmental Vulnerability Score) el puntaje que recibe es de 16, que la ubica en la categoría de alta vulnerabilidad ($EVS \geq 14$) (Wilson et al., 2013). La lagartija *S. aeneus* presenta una distribución geográfica limitada, ocupa pocos tipos de hábitat y presenta baja vagilidad lo que incrementa su vulnerabilidad ante alteraciones ambientales. Estas características, junto con su alto puntaje de EVS la clasifican como una especie de prioridad de conservación nivel 1, y requiere atención inmediata en términos de monitoreo y protección (Díaz-Cárdenas et al., 2024).

Área de estudio

Calimaya es un municipio que pertenece al Estado de México, situado justo al sur del Nevado de Toluca, la cuarta montaña más alta de México y que colinda con los valles de Toluca y Tenango del Valle. Cuenta con una temperatura media anual que varía entre los 12°C y 14°C (INAFED, 2022), el uso del suelo y su vegetación consta de zonas destinadas para la agricultura (73.72%), zonas urbanas (5.9%), bosques (12.44%) y pastizales (7.94%) (Gómez et al., 2022).

Esta zona del Estado de México, se caracteriza por una vegetación predominantemente de bosque templado, compuesta por pinos (*Pinus spp.*), oyamel (*Abies religiosa*) y encinos (*Quercus spp.*), que presenta una altitud promedio de aproximadamente 2,680 msnm, aunque dentro de su territorio existe un gradiente altitudinal que va de 2,600 a más de 4,500 msnm, asociado a la cercanía con el Nevado de Toluca. En las partes más elevadas, se desarrollan pastizales de alta montaña dominados por gramíneas como *Calamagrostis sp.* y *Festuca sp.*, acompañadas de musgos y arbustos bajos. También se encuentran matorrales de montaña en áreas expuestas o alteradas, y vegetación ribereña en barrancas o zonas con escurrimientos temporales. Además, en lugares perturbados existen áreas agrícolas y de vegetación

secundaria, donde se observan cultivos de temporada y reforestaciones (Ayuntamiento de Calimaya, 2022).

Al primer sitio donde se realiza este estudio se le asignó el nombre de “La Cruz” ($19^{\circ} 15' 47.55$ N, $99^{\circ} 33' 53.48$ O), en este sitio se observa una menor degradación ambiental. El segundo sitio es “La Mina” ($19^{\circ} 15' 08.2859$ N, $99^{\circ} 33' 39.6476$ O), en este sitio se puede observar un severo deterioro ambiental. Entre ambos sitios, aproximadamente, existe una distancia de 280-300 metros (Figura 1).



Figura 1. Imagen satelital de las zonas de estudio de *Sceloporus aeneus* obtenida de Google Earth (enero 2025), mostrando la ubicación de “La Mina” y “La Cruz”.

Trabajo en campo

En ambos sitios se capturaron manualmente individuos de *S. aeneus*. Se buscó entre la vegetación como macollos, arbustos y debajo de rocas. En la captura de cada individuo en un tiempo no mayor a 5 minutos después de su captura, que es el límite recomendado para evitar alteraciones en la proliferación de leucocitos debido al estrés por manipulación (Davis et al., 2008), se extrajo un volumen aproximado de 0.1 a 0.4 ml de sangre, cantidad considerada segura para individuos de este tamaño, de acuerdo con los volúmenes máximos

recomendados para reptiles, que no exceden el 0.5–1 % del peso corporal (Jacobson, 2007; Campbell, 2015) (Figura 2). La muestra se obtuvo de la vena coccígea ventral, uno de los sitios de venopunción más recomendados y menos invasivos para reptiles, tomando en cuenta la presencia de los hemipenes en los machos (Eatwell et al., 2014); para ello se utilizó una jeringa de 31G x 6 mm y se realizaron de 1-3 frotis por cada individuo. Posteriormente, con la ayuda de una regla plástica (1 mm) se midió la longitud hocico-cloaca (LHC) y la longitud de la cola (LC), con una Pesola® se registró el peso en g, además se sexaron los individuos por coloración ventral, y por último se realizó un marcaje en la parte ventral de la cabeza (Figura 3), con ayuda de un cauterizador médico haciendo una marca en la superficie ventral de la mandíbula inferior, asignando los dígitos correspondientes para formar un código numérico único para identificar a cada individuo (Ekner et al., 2011). El muestreo se llevó a cabo en seis salidas de campo entre julio y octubre de 2024, con dos salidas adicionales en diciembre de 2024 y febrero de 2025.



Figura 2. Extracción de muestra sanguínea de *Sceloporus aeneus* a través de la vena coccígea.



Figura 3. Marcaje de un individuo de *Sceloporus aeneus* mediante cauterización para su identificación en campo.

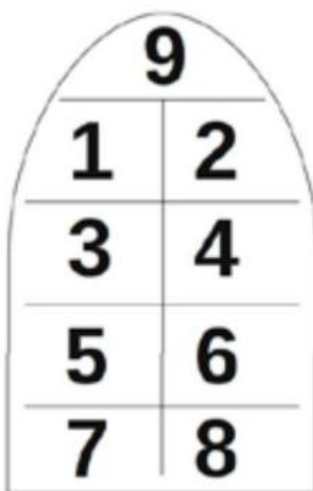


Figura 4. Código numérico basado en las escamas de la parte ventral de la cabeza de los individuos de *Sceloporus aeneus* (obtenido de Ekner et al., 2011).

Análisis de datos

En el Laboratorio de Herpetología, los frotis obtenidos en campo se tiñeron con colorante Wright. El proceso de tinción consistió en cubrir el frotis con el colorante Wright por 5 minutos, después se agregó directamente la solución buffer, al agregarlo se formó un brillo metálico, y se dejó actuar otros 5 minutos y se enjuagó con agua destilada y por último se dejó secar (Stacy et al., 2011). Las muestras se observaron bajo un microscopio de la marca OLYMPUS modelo CX41 con el objetivo de 100x utilizando aceite de inmersión. Se identificaron todas las células leucocitarias según su morfología basados en la literatura. Se contaron los: (1) linfocitos, células redondeadas con escaso citoplasma debido a su gran núcleo circular; (2) monocitos, células que pueden ser redondeadas o ameboides y se caracterizan por tener un núcleo en forma “arriñonada”; (3) basófilos, también son células redondas que cuenta con gránulos citoplasmáticos que frecuentemente ocultan el núcleo; (4) eosinófilos al igual que los basófilos tienen gránulos citoplasmáticos y pueden ser células redondas o contar con un lado más largo o ancho, y (5) heterófilos, células equivalentes a los neutrófilos en mamíferos, presentan formas redondeadas o se pueden observar formas irregulares con gránulos citoplasmáticos fusiformes con núcleos trilobulados (Martínez Silvestre et al., 2011). Para el conteo se seleccionó un campo al azar en cada muestra y se movía el portaobjetos en zigzag hasta contar 150 campos, esto con ayuda de contadores manuales, uno para cada célula y otro para los campos. Con los datos obtenidos y registrados en Excel se calcularon los perfiles leucocitarios expresados en proporciones de cada célula y se determinó la proporción Heterófilos/Linfocitos (H/L) de las dos zonas de estudio.

Morfometría

Se realizó un análisis morfométrico de las células leucocitarias para determinar su tamaño. Para ello, se utilizó una cámara de Neubauer como escala de referencia, considerando los cuadrantes de 50 micrómetros (μm). De cada tipo celular se capturaron diez fotografías, todas con un zoom de 2x, las cuales fueron analizadas mediante el software ImageJ. En este programa, las imágenes fueron calibradas para convertir los valores de píxeles a micrómetros. Posteriormente, se midió el diámetro celular; en el caso de células con morfología irregular, se registraron tanto el lado más largo como el lado más corto para obtener una estimación más precisa del tamaño y con los valores resultantes de cada fotografía se calculó la media ($\bar{x}$) de las dimensiones obtenidas para cada tipo de leucocito.

Análisis estadísticos

Para los análisis estadísticos se tomaron en cuenta las proporciones de los diferentes tipos celulares que componen el perfil leucocitario, es decir, la proporción de cada tipo de leucocito, y la proporción H/L. Inicialmente la normalidad de los datos se evaluó mediante la prueba de Shapiro–Wilk, Antes de realizar los análisis estadísticos, se evaluó el supuesto de normalidad de los datos utilizando Shapiro–Wilk, para aquellas variables que no cumplieron con el supuesto de normalidad se utilizó una transformación logarítmica ($\log_{10}$) con el propósito de aproximarlas a una distribución normal (Davis et al., 2011). Posteriormente a eso, se aplicó nuevamente la prueba Shapiro–Wilk, observándose que todos los datos transformados cumplieron con este supuesto, de igual manera se verificó el supuesto de la homocedasticidad con la prueba de Levene, lo que permitió proceder con los análisis estadísticos paramétricos. Posteriormente se realizaron análisis de correlación utilizando el coeficiente de Pearson, con el objetivo de evaluar la relación entre las proporciones de las

células leucocitarias y las variables sexo, LHC y peso. Los datos que no mostraron correlaciones significativas entre las variables analizadas se compararon entre sitios mediante un Análisis de Varianza (ANOVA) en donde la variable respuesta correspondió a las proporciones de cada tipo de célula leucocitaria (heterófilos, linfocitos, monocitos, eosinófilos, basófilos y la proporción H/L) y el factor considerado fue el sitio de estudio (“La Cruz” y “La Mina”).

Para los casos en los que sí existe una correlación se aplicó un Análisis de Covarianza (ANCOVA), utilizando como covariadas la LHC y el peso corporal, con el fin de controlar el efecto del tamaño y la condición física de los individuos sobre la variación leucocitaria. Todos los análisis estadísticos se realizaron en el software *Statgraphics 18*, utilizando un nivel de significancia alfa de 0.05.

Análisis del verdor de las áreas de estudio

Con el objetivo de visualizar el promedio del verdor a lo largo del tiempo se realizaron análisis comparativos en ambos sitios de estudio. En el proceso de análisis, se utilizó la plataforma web Climate Engine, con la finalidad de identificar la zona de interés y configurar las opciones para visualizar los datos en formato *raster*. Como variables de estudio se seleccionaron productos de percepción remota, específicamente el Índice de Vegetación Mejorado (*Enhanced Vegetation Index*, EVI), con el propósito de contrastar las condiciones de vegetación entre ambos sitios. Finalmente, se seleccionaron los años 2018 y 2024 como periodos de referencia para el análisis temporal. Este periodo se seleccionó con base en la disponibilidad y relevancia de la información. El año 2018 corresponde al inicio de la actividad minera en la zona de estudio, lo cual pudo ser identificado mediante registros

históricos de imágenes satelitales disponibles en Google Maps. Por su parte, el año 2024 se consideró debido a que corresponde al periodo en el que se llevó a cabo la presente investigación.

RESULTADOS

Muestreo

En el sitio denominado “La Cruz” se capturaron 29 individuos de *Sceloporus aeneus*, incluyendo 3 recapturas; de estos, 22 fueron hembras ($LHC = 48.82 \pm 1.74$ mm) y 7 machos ($LHC = 50.29 \pm 1.25$ mm). Se obtuvieron 64 muestras sanguíneas, de las cuales 20 resultaron inviables. En el segundo sitio de estudio, “La Mina”, se registraron 31 capturas, con 2 recapturas; en este caso, 19 fueron hembras ($LHC = 43.37 \pm 6.82$ mm) y 12 machos ($LHC = 41.67 \pm 5.90$ mm). Se obtuvieron 48 muestras sanguíneas, de las cuales 12 resultaron inviables. Cabe mencionar que las recapturas fueron consideradas como un conteo adicional para el análisis, por lo que, en total, se obtuvo un tamaño de muestra de 60 individuos adultos, con 5 recapturas, correspondientes a 19 machos y 41 hembras, lo que resultó en 80 muestras sanguíneas viables entre ambos sitios.

Algunas muestras fueron excluidas del análisis debido a que no cumplieron con los criterios de calidad para su evaluación microscópica. En algunos casos, el volumen de sangre obtenido no fue suficiente para la elaboración adecuada de más de un frotis, mientras que en otros la integridad celular se encontraba comprometida debido alteraciones morfológicas asociadas a degradación celular que dificultaban su identificación.

Morfometría leucocitaria

Las mediciones morfométricas muestran diferencias claras entre los tipos celulares (Tabla 1). Los linfocitos (Figura 5) y basófilos (Figura 6) presentaron los diámetros más pequeños. Los monocitos (Figura 7) y eosinófilos (Figura 8) ocuparon un intervalo de tamaño intermedio, aunque los monocitos mostraron una mayor elongación en comparación con los demás tipos

celulares. Mientras que los heterófilos (Figura 9) alcanzaron los valores más elevados tanto en el lado corto como en el largo.

Tabla 1. Medidas (en micrómetros, μm) de los distintos tipos de leucocitos observados en *Sceloporus aeneus*. Se observa la media ($\bar{x}$), el error estándar (EE), tamaño de muestra (n), así como el valor mínimo (Min) y máximo (Max) registrados para cada tipo celular de ambas poblaciones estudiadas.

	Medida evaluada	$\bar{x}$ (μm)	EE	n	Min	Max
Linfocitos	Diámetro	8.99	0.16	10	8.23	9.63
Basófilos	Diámetro	7.43	0.15	10	6.47	8.03
Monocitos	Lado corto	10.46	0.39	10	8.69	12.26
	Lado largo	13.00	0.60	10	9.62	15.80
Eosinófilos	Lado corto	10.36	0.28	10	9.01	11.57
	Lado largo	10.99	0.34	10	9.83	12.32
Heterófilos	Lado corto	14.00	0.22	10	13.23	15.60
	Lado largo	15.64	0.29	10	13.76	16.74



Figura 5. Frotis sanguíneo de *Sceloporus aeneus* observado a 100×. Se señala un **linfocito** (indicado con flecha). La barra de escala corresponde a 20 micrómetros.



Figura 6. Frotis sanguíneo de *Sceloporus aeneus* observado a 100×. Se señala un **basófilo** (indicado con flecha). La barra de escala corresponde a 20 micrómetros.



Figura 7. Frotis sanguíneo de *Sceloporus aeneus* observado a 100×. Se señala un **monocito** (indicado con flecha). La barra de escala corresponde a 20 micrómetros.



Figura 8. Frotis sanguíneo de *Sceloporus aeneus* observado a 100×. Se señala un **eosinófilo** (indicado con flecha). La barra de escala corresponde a 20 micrómetros.



Figura 9. Frotis sanguíneo de *Sceloporus aeneus* observado a 100×. Se señala un **heterófilo** (indicado con flecha). La barra de escala corresponde a 20 micrómetros.

Perfiles leucocitarios y proporciones H/L

Los porcentajes de las proporciones leucocitarias de *S. aeneus* en la población de “La Cruz” mostraron una mayor abundancia de linfocitos (41%), seguidos por heterófilos (18%), basófilos (18%), eosinófilos (14%) y monocitos (9%). Con base en estos datos, la proporción heterófilo/linfocito (H/L) promedio para esta población fue de 0.49. En contraste, en la población de “La Mina”, se registró una mayor abundancia de eosinófilos (32%), seguidos por linfocitos (28%), heterófilos (19%), basófilos (11%) y monocitos (10%). La proporción H/L promedio en esta población fue de 0.96.

En el caso de “La Cruz” (Tabla 2), no se encontró correlación alguna. Sin embargo, en el sitio “La Mina”, se observó una correlación entre el peso y la LHC con la abundancia de linfocitos y eosinófilos (Tabla 3).

Tabla 2. Coeficientes de correlación entre las variables LHC, peso y sexo con respecto a las proporciones de las células leucocitarias en *Sceloporus aeneus* de la población “La Cruz”, Calimaya, Estado de México. Se muestra el valor de Pearson y sus respectivos valores de significancia (P). No se observaron correlaciones estadísticamente significativas en esta población ($P > 0.05$).

		Monocitos	Eosinófilos	Basófilos	Heterófilos	Linfocitos	H/L
LHC	Pearson	0.1318	0.1223	0.0797	-0.1481	-0.0513	-0.0991
	P	0.4955	0.5274	0.6810	0.4431	0.7915	0.6090
	n	29	29	29	29	29	29
Peso	Pearson	-0.2085	0.1395	0.0535	-0.0231	-0.0519	-0.0756
	P	0.2778	0.4704	0.7828	0.9055	0.7891	0.6966
	n	29	29	29	29	29	29
Sexo	Pearson	0.0385	-0.0047	-0.0785	-0.0792	0.1124	-0.1655
	P	0.8427	0.9805	0.6856	0.6829	0.5614	0.3908
	n	29	29	29	29	29	29

Tabla 3. Coeficientes de correlación entre variables LHC, peso y sexo con respecto a las proporciones las células leucocitarias en *Sceloporus aeneus* de la población “La Mina”, Calimaya, Estado de México. Se presentan el valor de Pearson y sus respectivos valores de significancia (P). En negritas se resaltan los valores con significancia estadística ($P < 0.05$).

		Monocitos	Eosinófilos	Basófilos	Heterófilos	Linfocitos	H/L
LHC	Pearson	0.1626	-0.3837	0.0688	-0.0211	0.3859	-0.0001

		Monocitos	Eosinófilos	Basófilos	Heterófilos	Linfocitos	H/L
	P	0.3822	0.0331	0.7133	0.9104	0.0320	0.9998
	n	31	31	31	31	31	31
Peso	Pearson	0.1828	-0.4322	0.1783	-0.0503	0.4126	-0.0679
	P	0.3251	0.0152	0.3372	0.7880	0.0211	0.7168
	n	31	31	31	31	31	31
Sexo	Pearson	0.1614	-0.2136	-0.1426	0.1889	0.1374	0.0608
	P	0.3858	0.2485	0.4442	0.3089	0.4611	0.7451
	n	31	31	31	31	31	31

Dado que en la población de “La Cruz” no se identificó resultado alguno significativo para determinar correlaciones, y en la población de “La Mina” el sexo tampoco mostró presencia de correlación con la abundancia de células leucocitarias, se procedió a realizar un análisis de varianza (ANOVA) para comparar ambos sitios de estudio y determinar si existen diferencias significativas en las proporciones celulares atribuibles al sitio de muestreo. Para ello, cabe mencionar que se verificó el cumplimiento del supuesto de homocedasticidad mediante la aplicación de la prueba de Levene, confirmándose la igualdad de varianzas entre los grupos analizados ($P > 0.05$).

Los resultados observados en la Tabla 4, mostraron que no hubo diferencias significativas entre los sitios en las proporciones de monocitos ($F = 0.52$, $gl = 1$, 59 , $P < 0.471$), ni de heterófilos ($F = 0.58$, $gl = 1$, 59 , $P < 0.450$). Sin embargo, si se observaron diferencias significativas en la proporción de basófilos ($F = 18.30$, $gl = 1$, 59 , $P < 0.001$, Figura 10). De igual forma, la proporción H/L también presentó una diferencia estadísticamente significativa

entre poblaciones ($F = 6.86$ verificar en el cuadro dice 6.68, $gl = 1, 59$, $P < 0.0113$, Figura 11), “La Mina” presentó una mayor proporción de H/L (0.96) que “La Cruz” (0.49).

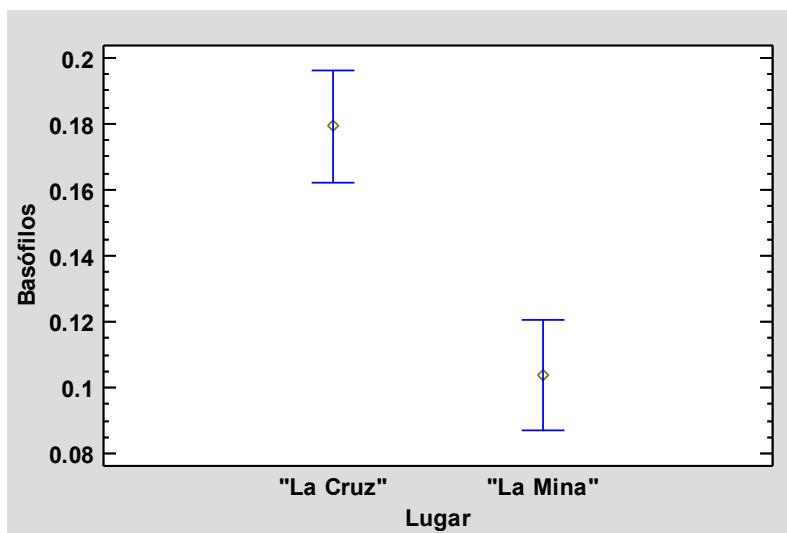


Figura 10. Comparación de la proporción de basófilos en individuos de *Sceloporus aeneus* entre los sitios “La Cruz” y “La Mina”. Los puntos representan la media con un intervalo de confianza al 95% (LSD de Fisher).

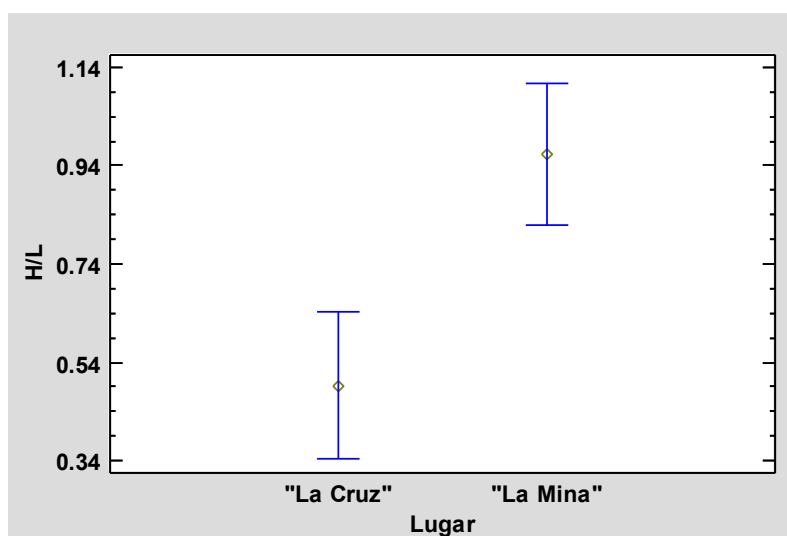


Figura 11. Comparación de la proporción H/L en individuos de *Sceloporus aeneus* entre los sitios “La Cruz” y “La Mina”. Los puntos representan la media con un intervalo de confianza al 95% (LSD de Fisher).

Tabla 4. Resultados obtenidos del ANOVA de las células leucocitarias que no mostraron correlación con las variables evaluadas en *Sceloporus aeneus* entre los dos sitios de estudio. Los valores significativos ($P < 0.05$) se indican en negritas.

Monocitos					
	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrados Medios	Razón F	Valor P
<i>Entre grupos</i>	0.00104283	1	0.00104283	0.52	0.4717
<i>Intra grupos</i>	0.115257	58	0.00198719		
<i>Total</i>	0.1163	59			
Basófilos					
	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrados Medios	Razón F	Valor P
<i>Entre grupos</i>	0.0802433	1	0.0802433	18.30	0.0001
<i>Intra grupos</i>	0.254322	58	0.00438486		
<i>Total</i>	0.334565	59			
Heterófilos					
	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrados Medios	Razón F	Valor P
<i>Entre grupos</i>	0.0048474	1	0.0048474	0.58	0.4506

<i>Intra grupos</i>	0.487438	58	0.0084041		
<i>Total</i>	0.492285	59			
H/L					
	Suma de	Gl	Cuadrados	Razón F	Valor P
	cuadrados		Medios		
<i>Entre grupos</i>	5.91543	1	5.91543	6.68	0.0113
<i>Intra grupos</i>	50.0429	58	0.862808		
<i>Total</i>	55.9583	59			

Para evaluar si las diferencias observadas en las proporciones de eosinófilos y linfocitos entre los dos sitios de estudio eran independientes del efecto de las variables de la talla (LHC) y el peso, se realizó un ANCOVA (Tabla 5). En el caso de los eosinófilos, ni el peso ($F = 0.32$, $gl = 59$, $P = 0.5739$), ni la LHC ($F = 0.70$, $gl = 59$, $P = 0.4062$) mostraron efectos significativos. Sin embargo, el efecto del sitio fue estadísticamente significativo ($F = 9.43$, $gl = 59$, $P = 0.0033$), observándose una mayor proporción promedio de eosinófilos en el sitio “La Mina” (0.32) en comparación con “La Cruz” (0.14, Figura 12), lo que respalda los resultados obtenidos a partir del perfil leucocitario, indicando que las diferencias observadas están asociadas a factores propios del sitio de muestreo y no en las covariables consideradas. De forma similar, para los linfocitos, ni el LHC ($F = 0.75$, $gl = 59$, $P = 0.3913$), ni el peso ($F = 0.12$, $gl = 59$, $P = 0.7314$) mostraron efectos significativos. No obstante, el efecto principal del lugar fue estadísticamente significativo ($F = 5.20$, $gl = 59$, $P = 0.0264$), observándose una mayor proporción promedio de linfocitos, obtenida a partir de los perfiles leucocitarios, en el sitio “La Cruz” (0.41) en comparación con “La Mina” (0.28), lo que sugiere que estas

diferencias en la proporción de linfocitos se deben a factores asociados al sitio de muestreo y no a las covariables consideradas (Figura 13).

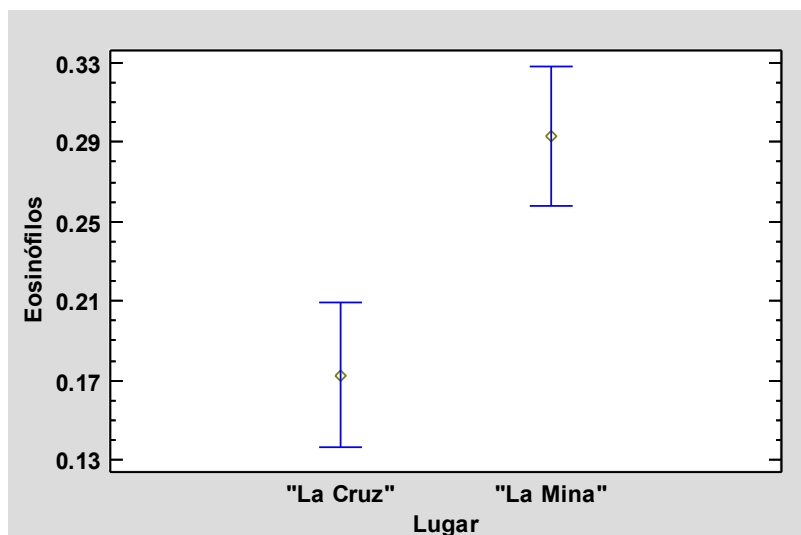


Figura 12. Comparación de la proporción de eosinófilos en individuos de *Sceloporus aeneus* entre los sitios “La Cruz” y “La Mina”. Los puntos representan la media con un intervalo de confianza al 95% (LSD de Fisher).

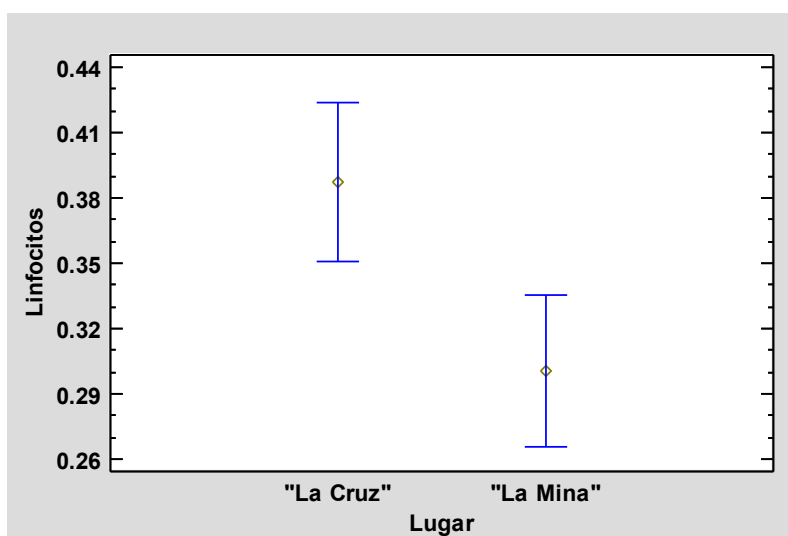


Figura 13. Comparación de la proporción de linfocitos en individuos de *Sceloporus aeneus* entre los sitios “La Cruz” y “La Mina”. Los puntos representan la media con un intervalo de confianza al 95% (LSD de Fisher).

Tabla 5. Resultados obtenidos del ANCOVA de las células leucocitarias que mostraron correlación con las variables evaluadas en *Sceloporus aeneus* entre los dos sitios de estudio. Los valores significativos ($P < 0.05$) se indican en negritas.

Eosinófilos					
<i>Covariables</i>	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrados Medios	Razón F	Valor P
<i>Peso</i>	0.00542169	1	0.00542169	0.32	0.5739
<i>LHC</i>	0.0118726	1	0.0118726	0.70	0.4062
<i>Efectos principales</i>					
<i>Lugar</i>	0.15988	1	0.15988	9.43	0.0033
<i>Residuos</i>	0.94912	56	0.0169486		
<i>Total</i>	1.57606	59			
Linfocitos					
<i>Covariables</i>	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrados Medios	Razón F	Valor P
<i>Peso</i>	0.00185223	1	0.00185223	0.12	0.7314
<i>LHC</i>	0.0116153	1	0.0116153	0.75	0.3913

<i>Efectos principales</i>					
<i>Lugar</i>	0.0809211	1	0.0809211	5.20	0.0264
<i>Residuos</i>	0.871373	56	0.0155602		
<i>Total</i>	1.24526	59			

Análisis del verdor de las áreas de estudio

Los análisis de la cobertura vegetal, entre los años 2018 y 2024 (tiempo que se observó el inicio de actividad minera a la actualidad), muestran una disminución notable en el verdor promedio de ambos sitios de estudio. Este descenso sugiere una pérdida de vegetación densa y saludable, asociada a procesos de degradación ambiental o cambios en el uso de suelo. Se observó que la zona que presentó mayor disminución del verdor fue “La Mina” y que se hace más notable en el año 2024 (Figura 14).

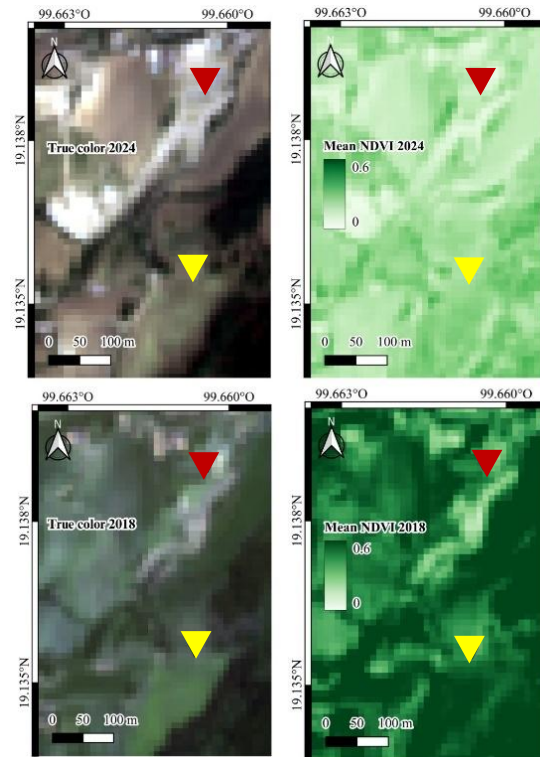


Figura 14. Imágenes satelitales de los sitios de estudio “La Mina” y “La Cruz” para los años 2018 y 2024. Las imágenes de la izquierda corresponden a composiciones en color verdadero (RGB), las cuales permiten una visualización general del paisaje y de los cambios en la cobertura del suelo. Las imágenes de la derecha muestran el NDVI promedio (Mean NDVI), que representa el verdor y la cobertura vegetal del área, donde los tonos de verde más oscuros indican mayor densidad y vigor de la vegetación, mientras que los tonos más claros corresponden a menor cobertura vegetal. El sitio “La Mina” se indica en rojo y “La Cruz” en amarillo.

DISCUSIÓN

Morfometría leucocitaria

Los resultados de las mediciones leucocitarias son similares a los registrados por Sánchez-Manjarrez (2024), que describe las medidas y características morfológicas de *Sceloporus grammicus*. En ambos casos, los linfocitos se caracterizan por presentar dimensiones relativamente pequeñas y formas esféricas, mientras que los heterófilos muestran tamaños mayores y formas irregulares, lo que coincide con la organización estructural registrada para estos tipos celulares. La similitud en las medidas y morfología entre ambas especies sugiere que existe una conservación en las características de los leucocitos. Sin embargo, en el presente trabajo se consideró la morfometría celular debido a que diversos estudios han demostrado que los parámetros hematológicos pueden variar en función de factores ambientales, como la altitud o a distinta disponibilidad de oxígeno. Por ejemplo, se ha documentado que poblaciones de lagartijas distribuidas a diferentes altitudes presentan variaciones en rasgos hematológicos y en el tamaño de células sanguíneas, lo que refleja posibles adaptaciones fisiológicas a ambientes hipoxémicos (González-Morales et al., 2017). No obstante, en el presente estudio no se observaron diferencias en las mediciones ni en la morfología de los leucocitos.

Variación del perfil leucocitario y su relación con la calidad del hábitat

Los resultados obtenidos muestran que, mientras los monocitos y heterófilos permanecen relativamente constantes entre sitios, la proporción H/L parece estar influenciada por las condiciones ambientales o de estrés específicas de cada sitio. En “La Mina” se observa un incremento en esta proporción respecto a los valores de “La Cruz”. Este patrón coincide con

lo señalado en estudios previos, donde la variación en la proporción de leucocitos ha sido asociada a la calidad del hábitat y a la presencia de factores estresantes, tales como variaciones térmicas, estacionalidad y disponibilidad de alimento, así como disturbios antrópicos como la pérdida de cobertura vegetal, la fragmentación del hábitat y actividades extractivas, entre ellas la minería (Davis et al., 2008). Cabe mencionar que para identificar de manera más directa las respuestas fisiológicas al estrés existen métodos más precisos, como la cuantificación de la corticosterona mediante técnicas como inmunoensayos (Romero y Reed, 2005; Sheriff et al., 2011). No obstante, estos procedimientos suelen requerir equipo especializado y mayores costos. En contraste, como ya se había mencionado, los perfiles leucocitarios y la proporción H/L, representan un indicador ampliamente utilizado debido a que su obtención es relativamente sencilla y permite evaluar cambios fisiológicos asociados al estrés (Davis et al., 2008).

En el caso de los eosinófilos, aunque ni la LHC ni el peso corporal mostraron un efecto significativo, sí se registraron diferencias entre sitios. De forma similar, en los linfocitos el efecto principal del sitio fue significativo, lo que refuerza la idea de que los factores propios de cada sitio son más determinantes que las covariables evaluadas. En la población de “La Mina” se registró un incremento notable en la proporción H/L en comparación con los valores de referencia recopilados de otras especies (Tabla 6), y se acerca a valores que sugiere un estado fisiológico alterado vinculado a condiciones de estrés ambiental. Este patrón es consistente con los valores de NDVI más bajos registrados en dicho sitio, los cuales reflejan una menor cobertura vegetal y un menor verdor del paisaje, asociados a la actividad minera. Estudios de impacto de actividades mineras han demostrado reducciones en la cobertura vegetal en áreas perturbadas, evidenciadas por una disminución de los valores de NDVI en

comparación con zonas sin minería (Musa y Jiya, 2011). La reducción de la cobertura vegetal y la alteración del suelo derivadas de estas actividades pueden generar cambios microambientales, como variaciones térmicas más pronunciadas y una disminución en la disponibilidad de refugios, incrementando los costos energéticos y la exposición a factores estresantes (Peña-Becerril et al., 2005). Por ejemplo, en *Thamnophis melanogaster* y *Barisia imbricata* se registraron proporciones H/L de 0.82 y 0.81, respectivamente, valores que reflejan niveles elevados de estrés. En *B. imbricata* este patrón se ha asociado a los altos costos energéticos derivados de las bajas temperaturas y la escasez de alimento durante la temporada invernal, mientras que en *T. melanogaster* se relaciona con los efectos de la antropización y las prácticas agrícolas presentes en su área de estudio (Sánchez-Manjarrez, 2024). En este contexto, los resultados obtenidos para *S. aeneus* sugieren que la disminución del verdor asociada a la actividad minera estaría influyendo en el aumento del estrés fisiológico observado, el cual se manifiesta a través de las variaciones en el perfil leucocitario y del incremento en la proporción H/L.

La abundancia de eosinófilos y basófilos resultó superior a la descrita en otras especies de saurópsidos, lo cual podría estar asociada con procesos inflamatorios crónicos o con la presencia de parásitos, dado que ambos tipos celulares participan activamente en respuestas inmunológicas frente a estas condiciones (Stacy et al., 2011). Si bien, el presente estudio no se enfocó en la búsqueda de parásitos en las muestras, el elevado porcentaje de eosinófilos registrado en la población de “La Mina” (32%) podría sugerir la posible presencia de parásitos; no obstante, esta relación no puede confirmarse con la información disponible, por lo que resulta necesario realizar estudios futuros enfocados en la identificación y evaluación parasitológica de los individuos. Esta tendencia puede estar vinculada a los efectos de la

actividad minera, que representa una amenaza significativa para la herpetofauna local. Entre las consecuencias fisiológicas negativas de la exposición a ambientes degradados se incluyen cambios en la respuesta inmunitaria asociados al estrés los cuales podrían incrementar la vulnerabilidad de los individuos a infecciones fúngicas, bacterianas o parasitarias. (Zimmerman et al., 2010), sin embargo, la evaluación de la supresión inmunológica requiere análisis funcionales adicionales que no fueron abordados en el presente estudio. Esto mismo se puede relacionar con la diferencia significativa en los basófilos, quien es comúnmente un tipo de leucocito con menor abundancia, desempeña funciones clave en la respuesta inmunitaria, particularmente en procesos inflamatorios crónicos, reacciones de hipersensibilidad e igualmente está implicada en la respuesta a parásitos (Stacy et al., 2011). Su aumento en el sitio “La Cruz” podría estar relacionado con condiciones ecológicas locales. En ambientes con mayor complejidad estructural y cobertura vegetal suele existir una mayor diversidad de organismos, incluidos hospedadores y vectores de parásitos, lo que puede favorecer la presencia y transmisión de parásitos en poblaciones silvestres (Hudson et al., 2006; Keesing et al., 2010). Por lo tanto, es posible que la mayor abundancia de basófilos observada en este sitio esté asociada a interacciones ecológicas propias de ambientes más conservados; sin embargo, esta relación no puede confirmarse en el presente estudio debido a que no se evaluó la presencia de parásitos en los individuos.

En el caso de los heterófilos, no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los sitios de estudio. No obstante, al analizar los resultados en conjunto con los linfocitos, es decir, la proporción H/L, se registró con valores más altos en el sitio “La Mina”. Este resultado se explica principalmente por la disminución en la proporción de linfocitos observada en dicho sitio, más que por un aumento en la abundancia de heterófilos. La

proporción H/L es ampliamente utilizada como un indicador fisiológico de estrés en vertebrados, ya que bajo condiciones de estrés crónico suele presentarse un incremento relativo de heterófilos acompañado de una reducción en el número de linfocitos (Davis et al., 2008).

En este sentido, la comparación infiere que los individuos de “La Mina” enfrentan mayores desafíos inmunológicos que los de “La Cruz”. En conjunto, estas diferencias responden más a condiciones ecológicas locales que a características individuales y refuerzan la idea de que la actividad minera que promueve la pérdida de cobertura vegetal no solo altera el hábitat, sino que también tienen repercusiones fisiológicas en las poblaciones locales de reptiles, evidentes en sus perfiles leucocitarios. En conjunto, estos resultados sugieren que las condiciones ambientales asociadas a la actividad minera podrían estar generando respuestas fisiológicas detectables en los perfiles leucocitarios de *S. aeneus*, lo que refuerza el potencial de estos indicadores hematológicos como herramientas para evaluar la salud de poblaciones silvestres en ambientes perturbados.

Tabla 6. Recopilación de las proporciones de células leucocitarias en diferentes especies de reptiles, incluyendo *Sceloporus aeneus* de ambos sitios de estudio (“La Cruz” y “La Mina”). Se muestran los porcentajes relativos de cada tipo celular, la proporción H/L, el método empleado para su obtención, tamaño de muestra (N) y la referencia

Especie	Heterófilos (%)	Linfocitos (%)	Monocitos (%)	Eosinófilos (%)	Basófilos (%)	H/L	Método	N	Referencia
Familia Lacertidae									
<i>Algyroides nigropunctatus</i>	15.7	67	0.4	7.7	8.9	0.23	Frotis sanguíneo	7	Sacchi et al., 2011
<i>Podarcis tiliguerta</i>	7.1	60.3	0.5	16.8	11.8	0.15	Frotis sanguíneo	8	Sacchi et al., 2011
Familia Teiidae									
<i>Aspidoscelis costatus costatus</i>	18	78	1.6	1.2	1.2	0.26	Frotis sanguíneo	17	Rangel-Patiño, 2014
Familia Anguidae									
<i>Barisia imbricata</i>	27.65	42.05	5.8	9.49	12.85	0.81	Frotis sanguíneo	30	Sánchez-Manjarrez, 2024
Familia Iguanidae									
<i>Iguana iguana</i>	1.84	3.27	15.3	76.2	3.39	0.56	Análisis bioquímico	32	Silvestre, 2011
Familia Agamidae									
<i>Intellagama lesuerii</i>	35.09	51.28	8.06	0	5.13	0.68	Análisis bioquímico	39	Johnson et al., 2018
<i>Pogona vitticeps</i>	27	59	5	0	9	0.46	Frotis sanguíneo	21	Eliman, 1997
Familia Phrynosomatidae									
<i>Sceloporus aeneus</i>	“La Cruz”	18	41	9	14	18	Frotis sanguíneo	60	Este estudio
	“La Mina”	19	28	10	32	11			
<i>Sceloporus occidentalis</i>	7.83	78.13	9	3.9	1.12	0.10	Frotis sanguíneo	29	Motz et al., 2014
Familia Colubridae									
<i>Conopsis lineata</i>	21.88	49.23	5.32	10.06	13.49	0.56	Frotis sanguíneo	6	Sánchez-Manjarrez, 2024
Familia Natricidae									
<i>Thamnophis eques</i>	17.06	42.5	10.22	12.72	17.25	0.43	Frotis sanguíneo	29	Sánchez-Manjarrez, 2024

Especie	Heterófilos (%)	Linfocitos (%)	Monocitos (%)	Eosinófilos (%)	Basófilos (%)	H/L	Método	N	Referencia
<i>Thamnophis melanogaster</i>	26.02	36.98	6.99	10.54	19.46	0.82	Frotis sanguíneo	7	Sánchez-Manjarrez, 2024
<i>Thamnophis scalaris</i>	19.58	47.32	7.45	12.41	13.21	0.46	Frotis sanguíneo	41	Sánchez-Manjarrez, 2024

Efectos de la minería y uso de hábitat

La disminución del verdor observada en las áreas de estudio se relaciona con los procesos de cambio de uso de suelo que han tenido lugar a partir del 2017, año que corresponde al inicio visible de las actividades extractivas en la zona de “La Mina”, esto de acuerdo con la revisión de imágenes satelitales disponibles en Google Earth. Los análisis realizados evidencian una reducción significativa en la cobertura vegetal en ambas zonas de estudio; sin embargo, esta pérdida resulta mucho más pronunciada en “La Mina”, donde la extracción de materiales y la acumulación de residuos sólidos han contribuido de manera notable al deterioro ambiental (Valencia García et al., 2016). En contraste, “La Cruz”, una zona con menor impacto humano y mayor integridad vegetal, representa un hábitat más estable y funcional para las lagartijas. La pérdida de cobertura vegetal expone el suelo a procesos erosivos más intensos, lo cual no solo afecta la regeneración natural del ecosistema, sino que también contribuye a la pérdida de nutrientes y al deterioro de la calidad del hábitat para la fauna (Arriaga, 2009).

Además del impacto ambiental negativo derivado de la pérdida de cobertura vegetal, la minería representa una amenaza significativa para la herpetofauna local, ya que produce alteraciones directas en los hábitats, como la compactación del suelo, cambios en la temperatura superficial, reducción en la disponibilidad de refugios y alteración de los ciclos hidrológicos, factores que afectan de manera particular a los reptiles, dado que son animales

ectotermos que dependen de las condiciones microambientales para su termorregulación y comportamiento, debido a esto, se puede desencadenar estrés crónico en los organismos ectotermos (Bickford et al., 2010).

La variación observada en la proporción leucocitaria entre los sitios de estudio puede estar estrechamente vinculada con las diferencias en el uso y la selección del hábitat. En el sitio “La Mina” se ha registrado una distribución heterogénea del uso de suelo, donde los individuos de *S. aeneus* fueron observados sobre tres tipos de sustrato (rocoso, arenoso y herbáceo), siendo el herbáceo el más utilizado. Asimismo, en cuanto al uso de la vegetación, se reconocieron cuatro tipos (suelo desnudo, pastizal bajo, pastizal medio y vegetación densa), registrándose el mayor número de individuos en áreas con suelo desnudo, donde ellos pueden enfrentar mayores desafíos térmicos. Estos patrones indican que los organismos no se distribuyen de manera uniforme dentro del sitio, sino que utilizan microhábitats contrastantes, característicos de ambientes perturbados (Marín-López, en proceso). En contraste, en el sitio “La Cruz” se observó una sola selección de hábitat, con una marcada preferencia por el sustrato herbáceo y una mayor concentración de registros en áreas con pastizal medio, dentro de los tipos de vegetación considerados. Esta menor heterogeneidad en el uso del hábitat sugiere condiciones ambientales más estables y estructuralmente conservadas (Marin-López, en proceso).

En conjunto, estas diferencias en la selección y disponibilidad de microhábitats sugieren que factores ecológicos como la estructura de la vegetación, el microclima y la disponibilidad de refugios influyen de manera importante en la distribución espacial y el comportamiento de *S. aeneus*. La heterogeneidad del hábitat y las variaciones en el uso del suelo condicionan la presencia y abundancia de reptiles, particularmente en ambientes sujetos a perturbación

antrópica, donde la reducción de la cobertura vegetal y los cambios en la estructura del paisaje modifican las condiciones térmicas y la disponibilidad de refugios (Gardner et al., 2007). En este contexto, las diferencias observadas entre “La Mina” y “La Cruz”, reflejadas tanto en el uso del sustrato como en los tipos de vegetación y en los valores de NDVI, sugieren que la menor cobertura vegetal y el menor verdor del paisaje en el sitio impactado por la actividad minera generan condiciones ambientales más estresantes, lo cual puede repercutir en el estado fisiológico de los individuos y manifestarse en variaciones del perfil leucocitario (Musa y Jiya, 2011; Davis et al., 2008).

Asimismo, la minería a cielo abierto libera metales pesados como plomo (Pb), mercurio (Hg), cadmio (Cd) y arsénico (As), que se acumulan en el suelo y cuerpos de agua, la exposición a estos contaminantes puede acumularse, especialmente en hígado, riñones y sangre, afectando órganos vitales, sistema inmune, función renal y reproducción (Soto-Benavente et al., 2020; Cedillo-Leal et al., 2016). También se generan polvos en suspensión PST, PM10 y PM2.5 (Rojano et al., 20015), los cuales pueden ser inhalados. Hay registros de reptiles que han sido expuestos a estos contaminantes y muestran anomalías hematológicas como en los eritrocitos, igualmente alteraciones en los leucocitos y disminución en la capacidad de transporte de oxígeno especialmente por especies que permanecen en madrigueras, grietas o cerca del suelo (López et al., 2015; Flood-Garibay et al., 2019). En especies de peces, aves y mamíferos, se han documentado lesiones pulmonares, inflamación de vías aéreas, dificultad para el intercambio gaseoso y disminución de la eficiencia respiratoria (López et al., 2015), efectos que también podrían presentarse en reptiles ante condiciones ambientales similares. Sin embargo, hasta el momento no se cuenta con evidencia específica para *S. aeneus*, por lo que son necesarios más estudios que evalúen si esta especie presenta alteraciones

respiratorias comparables, especialmente en contextos de exposición a contaminantes o condiciones ambientales desfavorables.

CONCLUSIONES

El presente estudio permitió evaluar los efectos de la actividad minera sobre las características ambientales y fisiológicas de *Sceloporus aeneus* en dos poblaciones del municipio de Calimaya, Estado de México. Los resultados evidencian que las condiciones ambientales asociadas a la actividad minera influyen de manera significativa en el estado fisiológico de la *S. aeneus*, particularmente a través de modificaciones en su perfil leucocitario.

La proporción H/L mostró diferencias claras entre las poblaciones estudiadas, registrándose valores más elevados en el sitio de “La Mina” en comparación con el sitio relativamente conservado (“La Cruz”). Este incremento en la proporción H/L indica un mayor nivel de estrés fisiológico en los individuos expuestos a condiciones de mayor perturbación ambiental.

A partir del análisis de los perfiles leucocitarios, se observó que los individuos de *S. aeneus* provenientes del sitio con actividad minera presentan señales compatibles con un estado fisiológico alterado, lo que respalda el uso de los perfiles leucocitarios como herramientas sensibles para evaluar el estrés ambiental en reptiles silvestres. Asimismo, el aumento en la abundancia de eosinófilos y basófilos en esta población sugiere una posible activación sostenida del sistema inmunológico, potencialmente relacionada con procesos inflamatorios crónicos, presencia de parásitos o exposición a contaminantes asociados a la degradación del hábitat.

El análisis mediante imágenes satelitales y el índice NDVI permitió identificar diferencias en el verdor del paisaje entre ambos sitios, registrándose valores más bajos en el área con

actividad minera. Esta disminución del verdor refleja una menor cobertura vegetal y una mayor degradación ambiental, lo cual se relaciona de manera consistente con las variaciones observadas en los perfiles leucocitarios. En conjunto, estos resultados sugieren que la pérdida de cobertura vegetal y la alteración del hábitat asociadas a la minería influyen indirectamente en el estado fisiológico de *S. aeneus*, incrementando su exposición a factores estresantes.

En conjunto, estos hallazgos indican que la integración de información fisiológica y ambiental demuestra que la actividad minera no solo modifica el paisaje, sino que también tiene repercusiones fisiológicas medibles en las poblaciones locales de animales poco vagiles como *S. aeneus*. Este estudio resalta la importancia de considerar indicadores hematológicos y herramientas de análisis espacial como el NDVI para evaluar el impacto de las actividades antrópicas sobre la herpetofauna y contribuye al entendimiento de los efectos del disturbio ambiental en especies silvestres.

BIBLIOGRAFÍA

- Almeralla, C. M., Venegas, D. T., Pardo, C. G., y Ortuño, I. S. (2023). Primer registro de infección por *Batrachochytrium dendrobatidis* y por el nemátodo del género *Capillaria* y la ausencia de infección por *Ribeiroia ondatrae* en *Ambystoma ordinarium*. *Revista Latinoamericana De Herpetología*, 6(4), e615-05.
- Amo de Paz, L., López, P., y Martín, J. (2007). Habitat deterioration affects body condition of lizards: A behavioral approach with *Iberolacerta cyreni* inhabiting ski resorts. *Biological Conservation*, 135(1), 77-85. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.09.020>.
- Andrade-Soto, G. En proceso. *Asimetría fluctuante y variación morfológica de Sceloporus aeneus (Squamata: Phrynosomatidae) en sitios con diferente degradación* (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma del Estado de México, México.
- Arriaga, L. (2009). Implicaciones del cambio de uso de suelo en la biodiversidad de los matorrales xerófilos: un enfoque multiescalar. *Investigacion ambiental* 1(1): 6-16.
- Ayuntamiento de Calimaya. (2022). *Plan de Desarrollo Municipal de Calimaya 2022–2024*. H. Ayuntamiento Constitucional de Calimaya, Estado de México. <https://www.calimaya.gob.mx/>
- Bickford, D., Howard, S. D., Ng, D. J. J., y Sheridan, J. A. (2010). Impacts of climate change on the amphibians and reptiles of Southeast Asia. *Biodiversity and Conservation*, 19(4), 1043-1062. <https://doi.org/10.1007/s10531-010-9782-4>
- Blázquez-Castro, S., Barrientos, R., Reguera, S., Barja, I., y Megía-Palma, R. (2026). *Thermoregulation strategies and microhabitat structure as determinants of susceptibility to heat waves in two sympatric Mediterranean lizards*. *Climatic Change*, 179(2), 1–21. <https://doi.org/10.1007/s10584-026-04119-2>

- Burke, V. J., y Gibbons, J. W. (1995). Terrestrial buffer zones and wetland conservation: A case study of freshwater turtles in Carolina Bay. *Conservation Biology*, 9(6), 1365-1369. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1995.09061365.x>
- Campbell, T. W. (2004). *Clinical pathology of reptiles*. In D. R. Mader (Ed.), *Reptile Medicine and Surgery* (2nd ed., pp. 453-470). Saunders Elsevier.
- Canseco-Márquez, L., Mendoza-Quijano, F. y Ponce-Campos, P. (2007). *Sceloporus aeneus*. The IUCN Red List of Threatened Species.
- Cedillo-Leal, C., Cienfuegos-Rivas, E., y Escobedo-Galván, A. H. (2016). Metales pesados en ecosistemas costeros y cocodrilos. Universidad de Guadalajara, 183-223.
- Davis, A. K., Maney, D. L., y Maerz, J. C. (2008). The use of leukocyte profiles to measure stress in vertebrates: A review for ecologists. *Functional Ecology*, 22(5), 760-772. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2008.01467>
- Díaz-Cárdenas, B., Castañeda-Gaytán, G., Pérez-Fiol, T., Banda-Leal, J., Sánchez-Romero, A., Smith, G. R., y Gadsden, H. (2024). Conservation status of *Sceloporus* lizards. *Amphibian & Reptile Conservation*, 18(1-2), 187-199.
- Doherty, T. S., Driscoll, D. A., Nimmo, D. G., Ritchie, E. G., y Spencer, R. J. (2020). *Conservation of species and ecosystems in the face of invasive predators: Current knowledge and future directions*. *Ecology Letters*, 23(10), 1409-1423.
- Duval, F., Félix González, y Hassen Rabia. (2010). Neurobiología del estrés. *Revista Chilena de Neuro-Psiquiatría*, 48(4), 307-318. <https://doi.org/10.4067/s0717-92272010000500006>
- Eatwell, K., Hedley, J., y Barron, R. (2014). Reptile haematology and biochemistry. *In Practice*, 36(1), 34-42. <https://doi.org/10.1136/inp.f7488>

- Ekner, A., Sajkowska, Z., Dudek, K., y Tryjanowski, P. (2011). Medical cautery units as a permanent and non-invasive method of marking lizards. *Acta Herpetologica*, 6(2), 229-236. https://doi.org/10.13128/Acta_Herpetol-9346
- Flood-Garibay, J. A., Méndez-Rojas, M. Á., y Pérez-Cortés, E. J. (2019). Sistema inmune respiratorio y consecuencias de contaminación aérea por materia particulada. *Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social*, 57(3), 170-180.
- Flores-Villela, O. A., y García-Vázquez, U. O. (2014). Biodiversidad de reptiles en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(Supl.), S467-S475. <https://doi.org/10.7550/rmb.43236>
- Gardner, T. A., Barlow, J., y Peres, C. A. (2007). Paradox, presumption and pitfalls in conservation biology: The importance of habitat change for reptiles. *Biological Conservation*, 138(1-2), 166-179. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2007.04.017>
- Google. (2025). *Google Earth Pro* (versión de escritorio) [Software]. <https://www.google.com/earth/>
- González-Morales, J. C., Beamonte-Barrientos, R., Bastiaans, E., Guevara-Fiore, P., Quintana, E., y Fajardo, V. (2017). *A mountain or a plateau? Hematological traits vary nonlinearly with altitude in a highland lizard*. *Physiological and Biochemical Zoology*, 90(6), 638-645.
- González-Pardo, C., Suazo-Ortuño, I., Mendoza-Almeralla, C., Tafolla-Venegas, D., Yurixhi Maldonado-López, y Meléndez-Herrera, E. (2024). Perfil de leucocitos como biomarcador hematológico en poblaciones de la salamandra de arroyo *Ambystoma ordinarium*. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 95. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2024.95.5330>

- González Pérez, R., Martínez Fernández, J., y Sánchez Hernández, D. (2012). *La degradación de tierras mediante análisis fisiográfico*. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5017781>
- Gómez, Y., Suárez, S., Escamilla, A., Guadalupe, A., Ibarra, R., Arzate Villar, A., Yahir, E., Mondragón, R., y Angélica, L. (2022). Plan de desarrollo Calimaya. https://www.calimaya.gob.mx/contenidos/calimaya/docs/214_plan-de-desarrollo-municipal-de-calimaya-2022-2024-final_2241165602.pdf
- Hernández-Gallegos, O., Méndez-de la Cruz, F. R., Villagrán-Santa Cruz, M., Rheubert, J. L., Granados-González, G., y Gribbins, K. M. (2014). Seasonal spermatogenesis in the Mexican endemic oviparous lizard *Sceloporus aeneus* (Squamata: Phrynosomatidae). *Spermatogenesis*, 4(3), e988585. <https://doi.org/10.4161/21565562.2014.988585>
- Hudson, P. J., Rizzoli, A., Grenfell, B. T., Heesterbeek, H., & Dobson, A. P. (2006). *The Ecology of Wildlife Diseases*. Oxford University Press.
- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED). (2022). Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México: Estado de México, Calimaya. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/inafed>
- IUCN. (2007). *Sceloporus aeneus*. The IUCN Red List of Threatened Species. Recuperado el 01 de febrero de 2026, de <https://www.iucnredlist.org>
- Jacobson, E. R. (2007). *Clinical pathology*. En *Infectious diseases and pathology of reptiles: Color atlas and text*. CRC Press.
- Keesing, F., Belden, L., Daszak, P., et al. (2010). Impacts of biodiversity on the emergence and transmission of infectious diseases. *Nature*, 468, 647–652.
- López, L. C., Ortega, N. A., y Verbel, J. O. (2015). Análisis de extendidos de sangre periférica en peces, reptiles y aves. *Ciénaga Miramar*, 169.

- Manríquez-Morán, N. L., Villagrán-Santa Cruz, M., y Méndez-de la Cruz, F. R. (2013). Reproductive activity in females of the oviparous lizard *Sceloporus aeneus*. *The Southwestern Naturalist*, 58(3), 325-329. <https://doi.org/10.1894/0038-4909-58.3.325>
- Marín-López, (en proceso). Uso de hábitat de *Sceloporus aeneus* (Squamata: Phrynosomatidae) en sitios con diferente degradación (Tesis de Licenciatura). Universidad Autónoma del Estado de México.
- Martínez-Silvestre, A., Lavín, S., Cuenca, R., y Marco, I. (2011). *Hematología y bioquímica clínica en reptiles*. Servet Editorial.
- Martín-Velasco, A., y Carón, E., (2007). Sangre. In *Bases de la fisiología* (pp. 91-141). Tébar.
- Mayani-Parás, F., Botello, F., Castañeda, S., & Sánchez-Cordero, V. (2019). *Impact of habitat loss and mining on the distribution of endemic species of amphibians and reptiles in Mexico. Diversity*, 11(11), 210. <https://doi.org/10.3390/d11110210>
- Mendoza, F. Á., Cantú, E. T., Lazcano, D., Setser, K. W., & Deloya, E. M. (2011). Morfología de las células sanguíneas y perfil leucocitario de *Crotalus polystictus* (Cope 1865). *CIENCIA-UANL*, 14(1), 53-59.
- Motz, V. L., Campbell, G. J., y Arnold, S. J. (2014). Hematological parameters of the western fence lizard (*Sceloporus occidentalis*). *Journal of Herpetology*, 48(2), 234-241.
- Motz, V.L., Lewis, W.D., y Vardo-Zalik, A.M. (2014). Leukocyte profiles for western fence lizards, *Sceloporus occidentalis*, naturally infected by the malaria parasite *Plasmodium mexicanum*. *Journal of Zoology*, 295(2), 104-111.
- Musa, H. D., y Jiya, S. N. (2011). An assessment of the impact of mining on vegetation using NDVI technique. *Journal of Environmental Science and Technology*, 4(4), 383-390. <https://doi.org/10.3923/jest.2011.383.390>

- Peña-Becerril, J. C., Monroy-Ata, A., Álvarez-Sánchez, F. J., y Orozco-Almanza, M. S. (2005). Uso del efecto de borde de la vegetación para la restauración ecológica del bosque tropical. *Tip Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 8(2), 91-98.
- Pineda E, y Halffter G. 2004. Species diversity and habitat fragmentation: frogs in a tropical montane landscape in Mexico. *Biological Conservation*. 117(5), 499–508. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2003.08.009>
- Ochoa-Ochoa, L. M., y Flores-Villela, O. A. (2006). Áreas de diversidad y endemismo de la herpetofauna mexicana. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)-Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).
- Ortega Planell, B. y Suárez, E. (2013). Niveles de corticosterona sérica en tortuga verde (*Chelonia mydas*) durante la temporada de anidación en la zona del Raudal, Veracruz. Universidad Veracruzana, Instituto de Neuroetología.
- Ramírez-Bautista, A., Lozano, A., Hernández-Salinas, U., & Cruz-Elizalde, R. (2016). Female reproductive characteristics among populations of the oviparous lizard *Sceloporus aeneus* (Squamata: Phrynosomatidae) from Central Mexico. *Herpetologica*, 72(3), 196-201. <https://doi.org/10.1655/Herpetologica-D-15-00020.1>
- Romero-Báez, Ó., Murphy, M. A., Díaz de la Vega-Pérez, A. H., & Vázquez-Domínguez, E. (2024). Environmental and anthropogenic factors mediating the functional connectivity of the mesquite lizard along the eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Molecular Ecology*, 33, e17469. <https://doi.org/10.1111/mec.17469>
- Romero, L. M., y Reed, J. M. (2005). Collecting baseline corticosterone samples in the field: is under 3 min good enough? *Comparative Biochemistry and Physiology Part A*, 140, 73-79.

- Rojano, R., Angulo, L., y Restrepo, G. (2015). Concentración y relación de PST, PM10 y PM2. 5 en poblaciones cercanas a minería a cielo abierto: caso Cerrejón Colombia. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 30(3), 39-48.
- Sánchez-Manjarrez, D. (2024). Perfiles leucocitarios de una comunidad de reptiles: variación estacional, sexual e interespecífica (Tesis de Doctorado). Universidad Autónoma del Estado de México.
- Santiago-Romero, H., García-Mello, A.-E., Arcos-García, J.-L., y Ruiz-García, N. (2023). Impacto de la extracción de materiales aluviales en la diversidad de reptiles del Río Tehuantepec, Oaxaca, México. *Revista de Biología Tropical*, 71(1), e52471. <https://doi.org/10.15517/rev.biol.trop.v71i1.52471>
- SEMARNAT, S. D. (2010). Secretaría de medio ambiente y recursos naturales. Recuperado el 12 de septiembre de 2025, de <http://www.semarnat.gob.mx/conocenos/Paginas/Quehacemos.aspx>.
- Sheriff, M. J., Dantzer, B., Delehanty, B., Palme, R., y Boonstra, R. (2011). *Measuring stress in wildlife: techniques for quantifying glucocorticoids*. *Oecologia*, 166, 869–887.
- Soto-Benavente, M., Frías-Navarro, D., y Pizarro, R. (2020). Toxicidad por metales pesados en reptiles. *Revista Chilena de Herpetología*, 17(2), 101-116.
- Soto-Benavente, Margarita, Rodriguez-Achata, Liset, Olivera, Martha, Arostegui Sanchez, Victor, Colina Nano, Cesar, y Garate Quispe, Jorge. (2020). Riesgos para la salud por metales pesados en productos agrícolas cultivados en áreas abandonadas por la minería aurífera en la Amazonía peruana. *Scientia Agropecuaria*, 11(1), 49-59. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.01.06>

- Stacy, N. I., Alleman, A. R., y Sayler, K. A. (2011). Diagnostic hematology of reptiles. *Clinical Laboratory Medicine*, 31(1), 87-108.
<https://doi.org/10.1016/j.cll.2010.10.004>
- Suazo-Ortuño, I., Alvarado-Díaz, J., y Martínez-Ramos, M. (2008). Effects of conversion of dry tropical forest to agricultural mosaic on herpetofaunal assemblages. *Conservation Biology*, 22(2), 362-374. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2008.00883>
- Treviño-Alanis, G. y Jaramillo-González, F. (2005). El sistema nervioso y su relación con el sistema inmunológico. Investigación y Ciencia. Universidad Autónoma de Aguascalientes Aguascalientes, México, vol. 13, núm. 33, pp. 14-21.
- Todd, B. D., Willson, J. D., y Gibbons, J. W. (2010). The global status of reptiles and causes of their decline. *Ecotoxicology of Amphibians and Reptiles*, 47-67.
- Tull, J. C., y Brussard, P. F. (2007). Fluctuating asymmetry as an indicator of environmental stress from off-highway vehicles. *The Journal of Wildlife Management*, 71, 1944-1948.
- Valderrama, X. (1992). The use of heterophil/lymphocyte ratios as a measure of stress in birds. *The Auk*, 109(3), 593–599.
- Valencia García, R., Cervantes, C., y Martínez, A. (2016). Degradación ambiental por actividades mineras en el Estado de México. *Revista Geográfica*, 58(4), 70-89.
- Valencia García, E. A., Ordaz Hernández, A., Baró Suárez, J. E., y Carrasco Gallegos, B. V. (2022). Territorial imbalances associated with mining activity in Calimaya, State of Mexico. *Boletín Geológico y Minero*, 133(2), 163-182.
<https://doi.org/10.21701/bolgeomin/133.2/007>
- Wilson, L.D., McCranie, J.R., y Johnson, J.D. (2013). The Environmental Vulnerability Score (EVS) system for evaluating Mesoamerican herpetofauna. En *The herpetofauna*

of Puebla, Mexico: composition, distribution, and conservation status (Mesoamerican Herpetology 4(4), p. 839).

Zimmerman, L. M., Vogel, L. A., y Bowden, R. M. (2010). Understanding the vertebrate immune system: Insights from the reptilian perspective. *Journal of Experimental Biology*, 213(5), 661-671. <https://doi.org/10.1242/jeb.038315>