

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades



**ANÁLISIS FITOGEOGRÁFICO DEL GRADIENTE  
ALTITUDINAL DE SIERRA DE LAS MINAS COSTA  
SURORIENTE DE GUATEMALA:  
BASE DE DATOS DE GBIF**

Trabajo de graduación presentado por María

José Ortiz Fernández

para optar el grado académico de Licenciada en Biología

Guatemala

2023



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades



**ANÁLISIS FITOGEOGRÁFICO DEL GRADIENTE ALTITUDINAL  
DE SIERRA DE LAS MINAS COSTA SURORIENTE DE  
GUATEMALA:**

**BASE DE DATOS DE GBIF**

Trabajo de graduación presentado por María

José Ortiz Fernández

para optar el grado académico de Licenciada en Biología

Guatemala

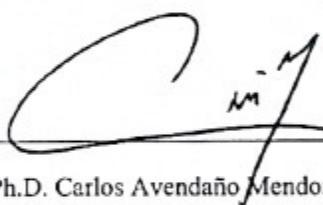
2023

Vo. Bo. :

(f)   
M.Sc. Zabdi Lopez

Tribunal Examinador:

(f)   
M.Sc. Zabdi Lopez

(f)   
Ph.D. Carlos Avendaño Mendoza

(f)   
M.Sc. Gabriela Alfaro Marroquin

Fecha de aprobación: Guatemala, 21 de junio 2023

## AGRADECIMIENTOS

Primero quiero agradecer a Dios, la vida y el universo, por darme la oportunidad de alcanzar este objetivo, por darme las fuerzas para seguir cuando los momentos se volvieron difíciles y por siempre guiarme bajo el camino correcto. Luego quiero agradecer a mi padre por siempre apoyarme desde el principio en el que decidí perseguir este sueño, quedando él en segundo plano, para que yo pudiera alcanzar lo que mi corazón quería, sacrificándose día a día y trabajando arduamente para que yo pudiera culminar exitosamente esta etapa de mi vida. Agradezco a mi madre por ser mi pilar y siempre demostrarme que soy capaz de hacer todo lo que me proponga y más. A ambos les agradezco por siempre creer en mí y en mis capacidades. Quiero agradecer a mis hermanos

Agradezco a mi tío, tías y abuela por siempre brindarme su ayuda, aconsejarme y hacer todo lo posible para que yo pudiera terminar esta etapa. Especialmente agradezco a mi tío “Koke” por ser mi apoyo estando lejos de casa, reconfortándome y estando incondicionalmente para mí. A mi abuelita Lily, por siempre estar ahí y enseñarme lo que es ser una mujer independiente, fuerte, luchadora y con éxito. Gracias por ser la persona que abrió camino a las mujeres de la familia para poder ser exitosas y realizar lo que nos propusiéramos tanto en el ámbito académico, como el profesional y personal.

Por último, agradezco a Gaby Alfaro y a todos los profesores que me apoyaron en el último semestre. También a Diego Incer por ayudarme en el proceso de obtener la metodología ideal para poder realizar este estudio. Agradezco a Zabdi López y a Carlos Avendaño por permitirme ser parte de este proyecto y por compartirme sus valiosos conocimientos. A ambos les agradezco sus palabras de aliento y motivación, así como compartir sus experiencias personales y su amor por la investigación, la paleobotánica, geografía, geología, etc.

## CONTENIDO

|  |            |
|--|------------|
| <b>Agradecimientos</b>   | <b>V</b>   |
| <b>Listado de cuadros</b>  | <b>Vi</b>  |
| <b>Listado de figuras</b>  | <b>Vii</b> |
| <b>Resumen</b>   | <b>ix</b>  |
| <b>Abstract</b>  | <b>x</b>   |
| <br>   |            |
| <b>I. Introducción</b>   | <b>1</b>   |
| <b>II. Antecedentes</b>  | <b>3</b>   |
| A. Origen fitogeográfico   | 3          |
| B. Fitogeografía neotropical   | 4          |
| C. Base de datos   | 10         |
| D. ¿Por qué estudiar la distribución altitudinal en la vegetación?   | 11         |
| E. ¿Por qué estudiar la distribución altitudinal en la vegetación de Sierra de las Minas y la costa suroriente del país? | 13         |
| F. Migración de especies en gradientes altitudinales   | 16         |
| <b>III. Justificación</b>  | <b>18</b>  |
| <b>IV. Objetivos</b>   | <b>21</b>  |
| <b>V. Hipótesis</b>  | <b>22</b>  |
| <b>VI. Métodos</b>   | <b>23</b>  |
| <b>VII. Resultados</b>   | <b>33</b>  |
| <b>VIII. Discusión</b>   | <b>51</b>  |

|             |                          |    |
|-------------|--------------------------|----|
| <b>IX.</b>  | <b>Conclusiones</b>      | 68 |
| <b>X.</b>   | <b>Recomendaciones</b>   | 69 |
| <b>XI.</b>  | <b>Literatura citada</b> | 70 |
| <b>XII.</b> | <b>Apéndices</b>         | 77 |

## LISTADO DE CUADROS

| <b>Cuadro</b>   | <b>Página</b> |
|---|---------------|
| <b>Cuadro 1.</b> Familias de origen Laurásico de la flora neotropical. Los números indican los géneros neotropicales con números de especies conocidos/especies en esos géneros (+ géneros neotropicales para lo que no se dispone de estimaciones de especies/ especies totales en dichos géneros) | 5             |
| <b>Cuadro 2.</b> Familias de Gondwana con centro Amazónico. Números indican géneros Neotropicales con especies conocidas/especies Neotropicales en dichos géneros (+ Géneros Neotropicales para los cuales los estimados no están disponibles/total de especies en dicho género)                    | 6             |
| <b>Cuadro 3.</b> Grupos de Gondwana con centro Andino. Números indican géneros Neotropicales con número de especies conocidas/especies Neotropicales en dichos géneros (+Géneros Neotropicales para los cuales el estimado de especies no está disponible/total de especies en dicho género)        | 7             |
| <b>Cuadro 4.</b> Taxa Miscelánea. Números indican géneros Neotropicales con número de especies conocidas/Especies Neotropicales en dichos géneros (+ Géneros Neotropicales para los cuales el estimado de especies es desconocido/total de especies en dicho género).                               | 8             |
| <b>Cuadro 5.</b> Resumen de estudios utilizados para realizar el análisis fitogeográfico del Gradiente Altitudinal Sierra de las Minas a Costa Suroriental.   | 26            |
| <b>Cuadro 6.</b> Continuación resumen de estudios utilizados para realizar el análisis fitogeográfico del Gradiente Altitudinal Sierra de las Minas a Costa Suroriental.  | 27            |
| <b>Cuadro 7.</b> Riqueza, abundancia y el origen dominante de los 26 pisos del Gradiente Altitudinal Sierra de las Minas a Costa Suroriental.   | 37            |
| <b>Cuadro 8.</b> Continuación riqueza, abundancia y el origen dominante de los 26 pisos del Gradiente Altitudinal Sierra de las Minas a Costa Suroriental.  | 38            |

## LISTADO DE FIGURAS

| <b>Figura</b>   | <b>Página</b> |
|---|---------------|
| <b>Figura 1.</b> Mapa zona de estudio y zonas de vida de Guatemala.   | 25            |
| <b>Figura 2.</b> Coordenadas biogeográficas de toma de datos por literatura consultada.   | 28            |
| <b>Figura 3.</b> Análisis de conglomerado para la relación de plantas según su origen y el gradiente altitudinal Sierra de las Minas Costa Suroriente de Guatemala utilizando el índice de similitud de Manhattan. Color rojo: Grupos Costa Sur, amarillo: Grupo Centro Seco, verde: Sierra de las Minas. | 33            |
| <b>Figura 4.</b> Análisis de caja de bigotes para los 26 pisos generados y la altitud del Gradiente de Sierra de las Minas Costa Suroriente de Guatemala. Color rojo: Grupos Costa Sur, amarillo: Grupo Centro Seco, verde: Sierra de las Minas.  | 35            |
| <b>Figura 5.</b> Porcentaje de frecuencia de familias por origen fitogeográfico presentes dentro de cada piso en el Gradiente de Sierra de las Minas Costa Suroriente de Guatemala.   | 39            |
| <b>Figura 6.</b> Gráfica de barras de riqueza de especies en los 26 pisos en el Gradiente de Sierra de las Minas Costa Suroriente de Guatemala y el origen fitogeográfico dominante por piso.   | 40            |
| <b>Figura 7.</b> Mapa de zonas de vida y los 26 pisos de Sierra de las Minas Costa Suroriente de Guatemala y el origen fitogeográfico   | 43            |
| <b>Figura 8.</b> Mapa de humedad y los 26 pisos de Sierra de las Minas Costa Suroriente de Guatemala y el origen fitogeográfico dominante por piso.   | 44            |
| <b>Figura 9.</b> Mapa de geología y los 26 pisos de Sierra de las Minas Costa Suroriente de Guatemala y el origen fitogeográfico dominante por piso.  | 45            |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 10.</b> Mapa vulcanología y los 26 pisos de Sierra de las Minas Costa Suroriente de Guatemala.  | 46 |
| <b>Figura 11.</b> Análisis de caja de bigotes para las variables de precipitación, humedad, temperatura y elevación de los 26 pisos del gradiente de Sierra de las Minas Costa Suroriente de Guatemala utilizando el índice de similitud de Manhattan con la clasificación de la geología de la zona. | 47 |
| <b>Figura 12.</b> Gráfica de barras de riqueza de especies endémicas en los 26 pisos en el Gradiente de Sierra de las Minas Costa Suroriente de Guatemala y el origen fitogeográfica dominante por piso.  | 49 |
| <b>Figura 13.</b> Mapa presencia de especies endémicas en las parcelas de estudio.  | 50 |
| <b>Figura 14.</b> Principales fallas de Guatemala.  | 52 |
| <b>Figura 15.</b> Mapa distribución de los tres grandes grupos (Costa Sur, Centro Seco y Sierra de las Minas).  | 55 |
| <b>Figura 16.</b> Cierre del istmo centroamericano (Coates, 1997).  | 62 |
| <b>Figura 17.</b> Mapa de clasificación de los suelos de Guatemala (SIE, 2019).   | 64 |

## I. INTRODUCCIÓN

Centroamérica y Guatemala albergan una rica diversidad de especies vegetales, con una alta cantidad de endemismo que sólo se encuentran en estas regiones. Guatemala, en particular, se considera uno de los países más biodiversos del mundo, con una amplia gama de ecosistemas y hábitats que sostienen alrededor del 8% de las especies de plantas conocidas en el mundo (Myers et al., 2000). Sin embargo, la comprensión de la distribución de estas plantas a través de diferentes elevaciones es todavía limitada.

Esta información es crucial para comprender cómo pueden responder las comunidades vegetales a las cambiantes condiciones ambientales y para fundamentar los esfuerzos de conservación destinados a proteger estos ecosistemas ante esta eminente amenaza. Para mejorar los esfuerzos de conservación es importante comprender qué factores influyen en la distribución de las especies vegetales. Dichos factores pueden ser bióticos (geografía, naturaleza del suelo, clima, etc.) o abióticos (competencia, mutualismo y factores humanos) (UNP, 2012).

El análisis de la información brindada por la base de datos digitales, tales como el Global Biodiversity Information Facility (GBIF) es una forma de abordar esta laguna de conocimiento. GBIF es una red internacional de investigación que proporciona acceso a una gran cantidad de datos sobre biodiversidad de todo el mundo, incluidos datos sobre la distribución y las características de las especies vegetales (Kessler *et al.*, 2001). GBIF recopila, integra y publica registros de presencia de especies y otra información relacionada con la biodiversidad procedente de una amplia gama de fuentes de todo el mundo y a lo largo de una década (Pennington *et al.*, 2006). Por ejemplo, los investigadores han utilizado los datos de GBIF para estudiar los impactos del cambio climático en la distribución de plantas y animales (Dornelas *et al.*, 2014).

Mediante el análisis de los datos de GBIF sobre especies vegetales de Guatemala, se puede conocer mejor la distribución de las especies vegetales en las distintas elevaciones y cómo esta distribución puede verse influida por factores como el clima, el tipo de suelo y la topografía (Rawat, et al., 2020).

Varios estudios han utilizado datos de GBIF para analizar la distribución de especies de plantas a través de diferentes elevaciones en distintas regiones del mundo. Por ejemplo, uno de los estudios más destacados sobre la distribución de especies de plantas es el de Cristóbal *et al.* (2020).

En este estudio, se utilizó información de GBIF para realizar un análisis de la distribución geográfica de la familia Orchidaceae en Chile. Encontrando que la mayoría de las especies estaban restringidas a áreas específicas del país y que había una alta concentración de especies en la zona centro-sur de Chile (Cristobal, et al., 2020).

Así pues, el componente tropical del neotrópico incluye en su mayoría taxones que vinieron de América del Sur después del cierre del puente terrestre de Panamá. Sin embargo, también hay un conjunto que probablemente vino de Gondwana a través del puente terrestre del Atlántico Norte. Por lo que también el comprender a la historia geológica de la Tierra, da apertura para entender la distribución actual de las especies vegetales, así como predecir posibles cambios en el futuro. Siendo la fitogeografía histórica la ciencia que permite estudiar e interpretar dichos fenómenos en plantas (De la Torre, *et al.*, 2016). Dicha ciencia permite interpretar la distribución de las plantas a lo largo del tiempo, describiendo los innumerables patrones de distribución de las especies y grupos taxonómicos (Hart, 2000).

Además, ésta se relaciona con los conocimientos sobre Paleogeografía, Paleobotánica y Paleoecología, en función de los regímenes climáticos y la topografía del pasado (Lawley y Sword, 2016), dado que los movimientos de los continentes, la ubicación y composición de las biotas ancestrales, permiten plantear una hipótesis de la distribución pasada de los organismos, pudiendo relacionarla con la distribución actual y posible futura (UNP, 2012).

En este estudio, se analizaron los datos de GBIF sobre especies de plantas en el área de Sierra de las Minas y el Suroriente de Guatemala para examinar cómo se distribuyen las especies de plantas a través de diferentes elevaciones. Utilizando métodos estadísticos para identificar patrones en la distribución de las especies de plantas y proporcionar información importante sobre el uso de bases de datos, la distribución altitudinal y mejorar la comprensión de cómo las comunidades de plantas pueden responder a las condiciones ambientales cambiantes (Villaseñor y Ortiz, 2019).

Este tipo de estudios es de suma relevancia ya que permite la implementación de procesos de restauración ecológica, así como determinación de áreas prioritarias de conservación. En efecto una de las principales contribuciones es la metodología implementada para análisis fitogeográficos con bases de datos de digitales.

## II. ANTECEDENTES

### A. ORIGEN FITOGEOGRÁFICO

La fitogeografía es la ciencia que estudia la distribución pasada y presente de las plantas e intenta describir y comprender los innumerables patrones de distribución de las especies y los grandes grupos taxonómicos. De tal forma que al hablar de origen fitogeográfico hablamos de la historia, que busca reconstruir el orden, dispersión y extensión de taxa y biotas. Otra postura es la fitogeografía ecológica, que considera las distribuciones actuales de las plantas en términos de interacciones entre organismos y su medio ambiente físico y biótico (UNP, 2012).

Estas dos ramas juegan un papel importante en la comprensión de la fitogeografía actual, pasada y futura. Así pues, la fitogeografía es una disciplina científica basada en ecología, ecología de poblaciones, biología evolutiva, ciencias geológicas e historia natural. De igual forma permiten plantear una hipótesis de la distribución actual, los conocimientos sobre paleogeografía, paleobotánica y paleoecología, en función de los regímenes climáticos y la topografía del pasado, los movimientos de los continentes, la ubicación y composición de las biotas ancestrales.

Los factores que influyen en la distribución de las especies vegetales son bióticos y abióticos. Dentro de los factores abióticos se encuentran los factores geográficos; dichas condiciones influyen en la distribución de los organismos de manera favorable o adversa, de acuerdo con la especie. Los mares, ríos, cordilleras y desiertos pueden actuar como barreras o como rutas de migración (Eisermann, 2006). Por tanto, se relaciona con factores edáficos ya que la naturaleza del suelo también interviene en la restricción geográfica de las especies. La estructura, textura y química del suelo, tienen además influencia en la cantidad de agua que puede absorber y retener el suelo, siendo factor crucial en la supervivencia de las plantas (Young *et al.*, 2004).

Finalmente, dentro de los factores abióticos el más importante en la distribución de las plantas es el clima, ya que cada especie requiere condiciones especiales para su óptimo desarrollo. Uno de los factores climáticos determinantes es la radiación solar y temperatura, debido a la fuente de energía que éste representa para las plantas. Aunado están las lluvias y vientos, debido a la

influencia en la dispersión de las plantas, determinando condiciones climáticas que actúan sobre las corrientes marinas (Abaurrea, 2001).

En muchos casos, la distribución de las plantas no está condicionada solamente a factores físicos, sino que otras especies juegan un papel limitante. Por ejemplo, la competencia es una interacción de mutuo detrimento entre individuos, puede ser interespecífica o intraespecífica. Si el recurso es limitado, organismos que poseen similares requerimientos, necesariamente compiten y sufren disminución en su crecimiento, supervivencia y reproducción. Las plantas pueden competir por la luz, el agua, nutrientes o polinizadores (Blair *et al.*, 2006). Así mismo existe el mutualismo ya que en esta relación el crecimiento, la supervivencia y la reproducción de ambas especies se hallan íntimamente relacionadas. Finalmente, uno de los más importantes en la limitación de áreas de distribución, es la influencia humana.

## **B. FITOGEOGRAFÍA NEOTROPICAL**

El bosque neotropical tiene la mayor cantidad de especies de plantas del planeta, con más de 90,000 que la gran mayoría angiospermas (Thomas, 1999). El origen de estas plantas y su relación con la tectónica de placas fue puesto en evidencia por Raven y Axelrod (1974), donde se planteó la diferencia fundamental existente entre las floras de los continentes laurásianos y las de los continentes meridionales, que se agruparon en el momento del origen de las angiospermas. Además, se plantea que muchas familias de plantas, incluso aquellas compartidas por América del Norte y del Sur, pueden ser referidas a la flora de Gondwanalandia o a las de Laurasia, debido a sus patrones generales de distribución y al registro fósil.

Enumerando 51 familias de plantas gondwánicas que se cree que se extendieron desde América del Sur a América del Norte a mediados o finales del Cenozoico, de igual forma que la barrera ístmica disminuía. Habiendo para Laurasia, 29 familias cuya llegada a Sudamérica coincidió probablemente con la construcción del Istmo de Panamá a finales del Mioceno y el Plioceno (Cuadro No.1).

**Cuadro 1.** Familias de origen Laurásico de la flora neotropical. Los números indican los géneros neotropicales con números de especies conocidos/especies en esos géneros (+ géneros neotropicales para lo que no se dispone de estimaciones de especies/ especies totales en dichos géneros).

|                     |        |             |                  |           |               |
|---------------------|--------|-------------|------------------|-----------|---------------|
| †Aceraceae          | 1/5    |             | (Krameriaceae)   | 1/15      |               |
| Actinidiaceae       | 1/80   |             | Labiatae (?)     | 14/489    | (+13/1,594)   |
| *Aquifoliaceae      | 1/150  |             | †Lennoaceae      | 4/8       |               |
| Aristolochiaceae    | 3/182  |             | Liliaceae        | 23/167    | (+15/1,217)   |
| †Balsaminaceae      | 1/2    |             | *Lythraceae (?)  | 16/361    |               |
| *Basellaceae        | 3/7    |             | Magnoliaceae     |           | (+2/130)      |
| Bataceae            | 1/1    |             | Myricaceae       |           | (+1/35)       |
| Berberidaceae       | 1/24   | (+1/450)    | †(Nyssaceae)     | 1/1       |               |
| Betulaceae          | 3/5    |             | Oleaceae         | 8/52      |               |
| Boraginaceae (?)    | 11/96  | (+14/1,020) | Orobanchaceae    | 1/2       | (+1/140)      |
| Buxaceae            | 3/42   |             | Papaveraceae     | 1/1       | (+3/120)      |
| Callitrichaceae (?) |        | (+1/25)     | †Pinaceae        | 4/40      |               |
| Caprifoliaceae      | 1/2    | (+4/458)    | Plantaginaceae   | 1/1       | (+1/265)      |
| Caryophyllaceae     | 6/77   | (+15/1,389) | †Platanaceae     | 1/7       |               |
| *Celastraceae       | 16/102 | (+4/361)    | Plumbaginaceae   | 2/7       |               |
| *Chloranthaceae     | 1/40   |             | Polemoniaceae    | 4/33      | (+5/276)      |
| Cistaceae           |        | (+3/120)    | Primulaceae      | 2/4       | (+2/210)      |
|                     |        |             | Pyrolaceae       | 1/1       | (+3/33)       |
| Clethraceae         | 1/38   |             | Rafflesiaceae    | 4/29      |               |
| Cornaceae           | 2/8    | (+1/6)      | Ranunculaceae    | 3/14      | (+7/1,097)    |
| Crassulaceae        | 3/25   | (+4/515)    | *Rhamnaceae      | 23/168    |               |
| †Crossosomataceae   | 1/4    |             | Rosaceae         | 16/95     | (+15/2,279)   |
| Cruciferae          | 19/93  | (+16/1,304) | *Sabiaceae (?)   | 2/47      |               |
| Cyrtillaceae        | 2/13   |             | Salicaceae       | 2/30      |               |
| Droseraceae         | 1/20   |             | Saxifragaceae    | 12/85     | (+5/730)      |
| Empetraceae         | 1/1    |             | Scrophulariaceae | 70/853    | (+4/185)      |
| Ephedraceae (?)     |        | (+1/40)     | Staphyleaceae    | 2/5       | (+1/30)       |
| Fagaceae            | 4/164  |             | Styraceae        | 1/3       | (+1/130)      |
| †Fouquieriaceae     | 2/8    |             | Symplocaceae     | 1/160     |               |
| †(Garryaceae)       | 1/18   |             | *Theaceae        | 7/84      | (+2/130)      |
| Gentianaceae        | 19/494 |             | Theophrastaceae  | 3/107     |               |
| Geraniaceae         | 4/42   | (+2/490)    | Typhaceae        |           | (+1/10)       |
| †Hamamelidaceae     | 3/5    |             | *Ulmaceae        | 6/17      | (+2/110)      |
| Hippocastanaceae    | 2/3    |             | Umbelliferae     | 48/480    |               |
| Hydrophyllaceae     | 2/46   | (+3/230)    | Valerianaceae    | 5/44      | (+1/200)      |
| †Illiciaceae        | 1/1    |             | *Vitaceae        | 2/3       | (+3/505)      |
| Juglandaceae        | 4/18   |             |                  |           |               |
|                     |        |             | Total            | 416/5,229 | (+157/15,834) |

† = does not reach South America.

\* = listed as moving from South America to North America by Raven and Axelrod (1974).

**Cuadro 2.** Familias de Gondwana con centro Amazónico. Números indican géneros Neotropicales con especies conocidas/especies Neotropicales en dichos géneros (+ Géneros Neotropicales para los cuales los estimados no están disponibles/total de especies en dicho género)

|                       |          |          |                   |            |              |
|-----------------------|----------|----------|-------------------|------------|--------------|
| Anacardiaceae (?)     | 15/133   | (+2/257) | (Lacistemaceae)   | 2/14       |              |
| Annonaceae            | 28/555   | (+3/250) | Lauraceae         | 11/700     | (+4/870)     |
| Apocynaceae           | 64/687   | (+2/125) | Lecythidaceae     | 11/275     |              |
| Bignoniaceae          | 72/631   |          | Leguminosae       | 216/2,980  | (+48/8,189)  |
| Bixaceae              | 1/5      |          | Loganiaceae       | 12/136     | (+2/106)     |
| Bombacaceae           | 20/187   |          | Malpighiaceae     | 44/801     |              |
| Burseraceae (?)       | 5/102    | (+2/120) | Meliaceae         | 8/125      |              |
| Caryocaraceae         | 2/24     |          | Menispermaceae    | 17/142     | (+1/30)      |
| Chrysobalanaceae      | 8/334    |          | Moraceae          | 23/408     |              |
| Cochlospermaceae      | 2/8      |          | Myristicaceae     | 5/81       |              |
| Combretaceae          | 7/97     |          | Ochnaceae         | 9/67       | (+1/300)     |
| Connaraceae           | 4/57     | (+1/100) | Olacaceae         | 13/87      |              |
| Convolvulaceae        | 21/1,000 |          | Palmae            | 52/1,110   | (+3/42)      |
| (Dialypetalanthaceae) | 1/1      |          | Polygalaceae      | 6/183      | (+3/630)     |
| Dichapetalaceae       | 3/43     |          | Quiinaceae        | 4/53       |              |
| Dilleniaceae          | 5/60     |          | Rhizophoraceae    | 5/24       |              |
| (Duckeodendraceae)    | 1/1      |          | Sapindaceae       | 27/438     | (+5/490)     |
| Ebenaceae             | 2/82     |          | Sapotaceae        | 9/208      | (+3/234)     |
| Elaeocarpaceae        | 4/7      | (+2/125) | Simaroubaceae     | 11/106     |              |
| Euphorbiaceae         | 92/2,607 |          | Sterculiaceae (?) | 14/293     | (+2/360)     |
| Flacourtiaceae        | 28/267   |          | Tiliaceae         | 20/139     |              |
| Gnetaceae             | 1/6      |          | Trigoniaceae      | 1/24       |              |
| Hernandiaceae         | 3/22     |          | Turneraceae (?)   | 1/60       | (+2/26)      |
| Hippocrateaceae       | 12/114   |          | Violaceae         | 11/98      | (+2/650)     |
| Humiriaceae           | 8/46     |          | Vochysiaceae      | 7/182      |              |
| Icaciniaceae          | 13/56    |          | Total             | 961/15,866 | (+88/12,904) |

**Cuadro 3.** Grupos de Gondwana con centro Andino. Números indican géneros Neotropicales con número de especies conocidas/especies Neotropicales en dichos géneros (+Géneros Neotropicales para los cuales el estimado de especies no está disponible/total de especies en dicho género)

|   |           |             |                  |                            |
|---|-----------|-------------|------------------|----------------------------|
| <i>5a. Northern Andes</i>                 |           |             |                  |                            |
| Acanthaceae                               | 61/1,493  |             | Loranthaceae     | 16/592 (+1/15)             |
| Araceae                                   | 38/1,386  |             | Marantaceae      | 10/270 (+1/11)             |
| Araliaceae                                | 5/197     | (3/356)     | Marcgraviaceae   | 4/125                      |
| Balanophoraceae                           | 7/15      |             | Melastomataceae  | 85/3,153                   |
| Begoniaceae                               | 1/600     |             | Monimiaceae      | 8/246                      |
| Bromeliaceae                              | 46/2,108  |             | Musaceae         | 2/82                       |
| Brunelliaceae                             | 1/51      |             | Myrsinaceae      | 12/311 (+2/600)            |
| Campanulaceae                             | 9/568     | (+7/712)    | Nyctaginaceae ?  | 27/277 (+3/160)            |
| Cannaceae                                 | 1/55      |             | Orchidaceae      | 306/8,266                  |
| Caricaceae                                | 3/29      |             | Oxalidaceae      | 1/8 (+2/870)               |
| Columelliaceae                            | 1/4       |             | Passifloraceae   | 4/362                      |
| Compositae                                | 502/3,864 | (+87/7,202) | Piperaceae       | 4/25 (+2/3,000)            |
| Cyclanthaceae                             | 11/178    |             | Rubiaceae        | 147/2,906 (+21/2,545)      |
| *Ericaceae                                | 37/731    |             | Tovariaceae      | 1/2                        |
| Gesneriaceae                              | 40/917    |             | Tropaeolaceae    | 2/92                       |
| Guttiferae                                | 21/232    | (+3/590)    | Urticaceae ?     | 7/88 (+6/653)              |
| Haloragidaceae                            | 1/1       | (+3/58)     | Zingiberaceae    | 4/111                      |
|   |           |             | Total            | 1,425/29,345 (+141/16,772) |
| <i>5b. Southern Andes/South Temperate</i> |           |             |                  |                            |
| †Aetoxicaceae                             | 1/1       |             | Loasaceae        | 12/266                     |
| †Auracariaceae                            | 1/2       |             | †Malesherbiaceae | 1/27                       |
| Calyceraceae                              | 4/46      |             | Myrtaceae        | 24/1,254 (+2/1,100)        |
| Coriariaceae                              | 1/1       |             | †Myzodendraceae  | 1/11                       |
| Cunoniaceae                               | 3/12      | (+1/170)    | †Nolanaceae      | 1/18                       |
| Cupressaceae                              | 3/5       |             | *Onagraceae      | 14/275                     |
| †Epacridaceae                             | 1/1       |             | Podocarpaceae    | 1/37                       |
| †Eucryphaceae                             | 1/1       |             | Portulacaceae    | 5/8 (+5/422)               |
| †Frankeniaceae                            | 3/8       |             | Proteaceae       | 3/92                       |
| †Gomortegaceae                            | 1/1       |             | †Restionaceae    | 1/1                        |
| Hydnoraceae                               | 1/6       |             | Santalaceae      | 7/43                       |
| Iridaceae                                 | 34/188    | (+1/100)    | Solanaceae       | 66/1,861 (+1/8)            |
| Juncaceae                                 | 6/49      |             | Winteraceae      | 1/1                        |
| †Lardizabalaceae                          | 2/3       |             |                  |                            |
|   |           |             | Total            | 199/4,218 (+10/1,800)      |

† = does not reach Central America.

\* = listed as moving from North America to South America by Raven and Axelrod (1974).

**Cuadro 4.** Taxa Miscelánea. Números indican géneros Neotropicales con número de especies conocidas/Especies Neotropicales en dichos géneros (+ Géneros Neotropicales para los cuales el estimado de especies es desconocido/total de especies en dicho género).

|                                  |          |           |                  |           |                |
|----------------------------------|----------|-----------|------------------|-----------|----------------|
| <i>Guayana-centered groups</i>   |          |           | Ceratophyllaceae | 1/2       |                |
| Burmanniaceae                    | 13/51    |           | Chenopodiaceae   | 10/34     | (2/14)         |
| Dipterocarpaceae                 | 1/1      |           | Commelinaceae    | 17/163    |                |
| Mayacaceae ?                     | 1/9      |           | Cucurbitaceae    | 55/311    |                |
| Podostemataceae                  | 19/151   |           | Cyperaceae       | 8/88      | (+ 18/3,738)   |
| Rapateaceae ?                    | 15/79    |           | Dioscoreaceae    | 1/15      | (+ 1/600)      |
| Saccifoliaceae                   | 1/1      |           | Elatinaceae      |           | (+ 2/45)       |
| Sarraceniaceae ?                 | 1/6      |           | Eriocaulaceae    | 12/868    |                |
| Tepuianthaceae                   | 1/1      |           | Goodeniaceae     | 1/1       |                |
| Triuridaceae                     | 4/12     |           | Gramineae        | 127/838   | (+ 80/4,692)   |
| Total                            | 56/311   |           | Haemodoraceae    | 1/2       |                |
| <i>Dry-area Gondwanan groups</i> |          |           | Hydrocharitaceae | 8/20      |                |
| Cactaceae                        | 60/2,000 |           | Juncaginaceae    | 2/5       |                |
| Capparidaceae                    | 10/40    | (+ 4/416) | Lemnaceae        | 4/12      |                |
| Erythroxylaceae                  | 1/180    |           | Lentibulariaceae | 3/116     |                |
| Koeberliniaceae                  | 1/1      |           | Linaceae ?       | 3/20      | (+ 1/230)      |
| Martyniaceae                     | 3/13     |           | Malvaceae        | 50/860    |                |
| Velloziaceae                     | 4/229    |           | Myoporaceae      | 1/1       |                |
| Zygophyllaceae                   | 12/62    |           | Najadaceae       | 1/8       |                |
| Total                            | 91/2,525 | (+ 4/416) | Nymphaeaceae     | 5/27      |                |
| <i>Unassigned</i>                |          |           | Phytolaccaceae   | 13/78     | (+ 2/38)       |
| Aizoaceae                        | 2/4      | (+ 4/90)  | Polygonaceae     | 10/203    | (+ 5/724)      |
| Alismataceae                     | 2/61     |           | Pontederiaceae   | 4/21      |                |
| Amaranthaceae                    | 7/188    | (+ 7/535) | Potamogetonaceae | 5/42      |                |
| Amaryllidaceae                   | 26/799   | (+ 3/210) | Rutaceae         | 36/233    | (+ 4/313)      |
| Asclepiadaceae                   | 46/932   | (+ 3/280) | Taccaceae        |           | (+ 1/30)       |
| Butomaceae                       | 2/7      |           | Thymelaeaceae    | 7/71      | (+ 1/10)       |
| Canellaceae                      | 3/11     |           | Verbenaceae      | 40/1,143  |                |
|                                  |          |           | Xyridaceae       | 2/21      | (+ 1/250)      |
|                                  |          |           | Total            | 516/7,206 | (+ 135/11,799) |

Es importante conocer el origen fitogeográfico de las especies ya que hay múltiples factores que influyen en la distribución de los vegetales. Estos factores pueden ser factores abióticos o bióticos. Algunos abióticos son la geografía, factores edáficos y climáticos. Siendo algunos bióticos la competencia, mutualismo, relación planta-animal y factores humanos (Eisermann, 2006). Por lo que en Guatemala se han realizado estudios que evalúan distintos factores que influyen actualmente e influyeron en el pasado la distribución de las especies en el país.

Avendaño (2012) determinó cuáles son los factores que explican la distribución de la vegetación a lo largo del gradiente ambiental de Las Verapaces y qué taxones pueden utilizarse como “especies indicadoras”. Él identificó tres cinturones de vegetación, determinando que éstos representan los cambios en las comunidades de vegetación a lo largo del gradiente de elevación en Las Verapaces, en el Altiplano y Tierras Bajas de Guatemala Central. Así mismo determinó que tanto la elevación como la variabilidad de la temperatura son los principales criterios para la delimitación de los cinturones de vegetación. Otros factores identificados fueron: la geomorfología y el origen biogeográfico, que aportaron explicaciones complementarias (Avendaño, 2012).

En este mismo estudio se identificaron los principales cambios de vegetación registrados en el centro de las tierras altas de la región de Las Verapaces. Esto se realizó a partir de métodos paleo ecológicos basados en el polen, reconstruyendo la historia ambiental de la zona de estudio. Se identificaron factores humanos, tales como la cultura que impulsó a una secuencia de cambios en la vegetación, así como la aparición de nuevos taxones y la disminución de la actividad solar.

Adicionalmente en Guatemala, López (2019) recopiló datos para la costa Suroccidental hasta la Sierra de los Cuchumatanes de Guatemala. Donde evidenció que dentro del gradiente altitudinal, existían asociaciones vegetales que se agruparon en diferentes conjuntos que fueron denominados pisos altitudinales. Estos pisos fueron definidos por las relaciones existentes entre las especies vegetales presentes. El origen fitogeográfico dominante evidenciado fue el Gondwaniano, con una alta frecuencia de especies con centro Misceláneo y especies Amazónicas, Andino Norte y Andino Sur.

Siendo las especies de origen Laurásico las de menor frecuencia. Bajo estos resultados se plantean algunos factores que afectan estos patrones de distribución. Siendo los principales la historia geológica del lugar, las glaciaciones del Pleistoceno, incrementos y disminuciones de temperatura.

## RESUMEN

La configuración topográfica de Guatemala ha generado a lo largo de la historia distintos niveles altitudinales que engloban zonas bioclimáticas diferentes entre sí. Estas características específicas permiten la investigación de los cambios causados por la altitud del clima (cambios hipsométricos) y del suelo, en unidades de vegetación (Schawe *et al.*, 2003). Los inventarios de vegetación dentro de una comunidad vegetal permiten la identificación de la respuesta ante distintas variables climáticas a lo largo del tiempo. Basado en el estudio de orígenes fitogeográficos de Gentry (1982), Avendaño (2012) y López (2019) con los gradientes de Lachuá a Cobán y la Sierra de los Cuchumatanes, se espera Analizar los cambios en la composición del origen fitogeográfico de la vegetación en el gradiente altitudinal de Sierra de las Minas- Costa Suroriente de Guatemala con bases de datos de GBIF.

Esta investigación tuvo como objetivo determinar los principales factores que influyen en los pisos ambientales estudiados y generar una explicación de la relación entre el origen fitogeográfico de la vegetación presente y la distribución espacial. Además, depurar y generar una base de datos con registros florísticos a partir de información obtenida en las bases de datos de GBIF. Este estudio aporta un componente cuantitativo y cualitativo a la explicación de la distribución vegetal en Guatemala, permitiendo comparar con estudios previos realizados que completan un perfil fitogeográfico importante para el país. Se generaron 26 pisos ambientales en el gradiente altitudinal de Sierra de las Minas costa suroriente de Guatemala. Los pisos del estudio están dominados por familias de origen Laurásico seguido de Amazónico y Andino Norte.

## **ABSTRACT**

The topographic configuration of Guatemala has historically generated different altitudinal levels that encompass different bioclimatic zones. These specific characteristics allow the investigation of changes caused by climate altitude (hypsometric changes) and soil changes in vegetation units (Schawe et al., 2003). Vegetation inventories within a plant community allow the identification of the response to different climatic variables over time. Based on the study of phytogeographic origins of Gentry (1982), Avendaño (2012) and López (2019) with the gradients from Lachuá to Cobán and the Sierra de los Cuchumatanes; it is expected to analyze the changes in the composition of the phytogeographic origin of the vegetation in the altitudinal gradient of Sierra de las Minas- Southeast Coast in Guatemala with GBIF databases.

The objective of this research was to determine the main factors that influence the environmental floors studied and to generate an explanation of the relationship between the phytogeographic origin of the vegetation present and its spatial distribution. In addition, to purify and generate a database with floristic records from information obtained in the GBIF databases. This study contributes a quantitative and qualitative component to the explanation of plant distribution in Guatemala, allowing comparison with previous studies that complete an important phytogeographic profile for the country. Twenty-six environmental zones were generated in the altitudinal gradient of Sierra de las Minas on the southeastern coast of Guatemala. The floors of the study are dominated by families of Laurassic origin followed by Amazonian and North Andean.

## C. BASE DE DATOS

Las bases de datos representan una herramienta fundamental en la investigación biológica, permitiendo la recopilación, almacenamiento y acceso rápido a una amplia información. Aunado, proporciona una plataforma para el intercambio de información a nivel mundial y análisis de datos, permitiendo tener acceso a la distribución y taxonomía. Una de las bases biológicas más importantes es el “Global Biodiversity Information Facility GBIF” ya que recopila y comparte información de la biodiversidad a nivel mundial. Por lo tanto, un uso importante de los datos de GBIF es el estudio de los patrones y cambios de la biodiversidad a lo largo del tiempo, por ejemplo, los investigadores han utilizado los datos de GBIF para estudiar los impactos del cambio climático en la distribución de plantas y animales (Dornelas *et al.*, 2014; Gaiji *et al.*, 2014). Los datos de GBIF también se han utilizado para evaluar la eficacia de las áreas protegidas en la conservación de la biodiversidad (Dias *et al.*, 2017).

Los datos de GBIF también han sido fundamentales para identificar áreas de alta biodiversidad y amenazas potenciales para los ecosistemas, por ejemplo, los datos de GBIF se han utilizado para cartografiar la distribución de especies invasoras y evaluar su posible impacto en la biodiversidad autóctona (Catford *et al.*, 2016; Strayer *et al.*, 2017). Además, los datos de GBIF se han utilizado para identificar regiones especialmente vulnerables al cambio climático y otros factores de estrés ambiental (Devictor *et al.*, 2012).

GBIF ha desempeñado un papel clave en la promoción de la colaboración internacional y el intercambio de datos en el campo de investigación de la biodiversidad, al proporcionar acceso libre y gratuito a los datos, GBIF, ha ayudado a investigadores y responsables políticos a tomar decisiones informadas sobre la conservación y gestión de la biodiversidad. Los datos de GBIF se utilizan cada vez más para fundamentar decisiones políticas a nivel nacional e internacional (Butchart *et al.*, 2010; IPBES, 2019).

Para Centroamérica Martínez y Herrera (2020) examinaron la fenología de especies arbóreas utilizando datos de GBIF, encontrando correlaciones entre patrones de floración y variables climáticas. Asimismo, Fernández *et al.* (2018) analizaron la distribución de especies invasoras en la región, evidenciando la necesidad de estrategias de control.

En resumen, la base de datos de GBIF es un recurso importante para la investigación y conservación de la biodiversidad. Los datos proporcionados por GBIF permiten a los investigadores estudiar patrones y cambios en la biodiversidad, identificar áreas de alta biodiversidad y amenazas potenciales a los ecosistemas y fundamentar decisiones políticas relacionadas con la conservación y gestión de la biodiversidad.

#### **D. ¿POR QUÉ ESTUDIAR LA DISTRIBUCIÓN ALTITUDINAL EN VEGETACIÓN?**

Los estudios sobre gradientes altitudinales han permitido examinar cambios en la riqueza y composición de los ensamblajes vegetales, lo que hace posible obtener información sobre las variables ambientales que determinan su distribución y factores que definen su estructura. Se conoce que la zonificación altitudinal de la vegetación permite estudiar de forma sistemática en un gradiente altitudinal los aspectos más relevantes de la cubierta vegetal, así como analizar los resultados a través de métodos de clasificación y ordenación desde las perspectivas de las comunidades vegetales (Alcaraz, *et al.*, 1999).

De igual manera al generar estos modelos de distribución de los pisos altitudinales se puede predecir los rangos de distribución de las especies o comunidades, con base en localidades de ocurrencia y variables climáticas, topográficas y ambientales, entre otras (Scott, *et al.*, 2002). Por ejemplo, en regiones tropicales, diversos estudios han encontrado que la riqueza de especies está limitada principalmente por restricciones climáticas asociadas con la precipitación, que tiende a concentrarse en las partes bajas y medias de los gradientes altitudinales permitiendo el establecimiento de zonas de mayor productividad, por lo tanto de mayor riqueza de especies (Barry, 2008).

La profunda variación en la composición, estructura y la biomasa aérea registrada en bosques tropicales se debe en gran medida al hecho de que ésta es dinámica y puede verse influenciada significativamente por fenómenos climáticos (precipitación, temperatura y humedad), biológicos (composición de especies, tipos de especie, estructura, grupo ecológico) y ambientales (altitud, edad del sustrato, fertilidad del suelo, topografía) (Brockley y Simpson, 2004).

Además, los bosques de esta zona son de suma importancia debido a la alta tasa de captura y almacenamiento de carbono atmosférico, ejerciendo un rol fundamental en el balance del carbono global y en la mitigación del calentamiento global (Pan *et al.*, 2013). De igual manera en los bosques neotropicales se ha evidenciado que la composición florística, estructura y biomasa aérea de los árboles está fuertemente explicada por la altitud. Por lo que se presume que la altitud presenta una fuerte correlación con la composición, estructura, diversidad y contenido de carbono de los bosques tropicales (Barry, 2008).

La riqueza de especies a través de gradientes altitudinales permite conocer cómo funcionan las comunidades a diferentes altitudes, debido a que en elevaciones menores existe una superficie potencial para el establecimiento de las especies y a mayor altitud la temperatura es menor, esto puede provocar que exista una menor cubierta vegetal que en las zonas (Brown, 2001). Así mismo las relaciones de la riqueza de especies con el área y la complejidad topográfica, pueden reflejar factores actuales o procesos evolutivos, los que el área del bioma y el equilibrio entre la especiación y la extinción han sido los factores clave de la variación regional en la riqueza de especies (Crecente y Miranda, 2002). Por lo que los estudios de distribución de especies en gradientes altitudinales son una herramienta fundamental para poder predecir la migración de las especies como resultados del cambio climático que está experimentando el planeta (Fossa, 2004).

Los cambios en el clima han demostrado que en el gradiente elevacional de la riqueza de especies puede adoptar múltiples formas, que el clima puede determinar los patrones de diversidad en el tiempo y el espacio dentro de las regiones montañosas. Sin embargo, es importante tomar en cuenta que los climas de montaña difieren en aspectos fundamentales de los de las tierras bajas: Por ejemplo, las montañas tropicales topográficamente complejas pueden abarcar un volumen notable de tipos climáticos diferentes, equivalentes al volumen climático de vastas extensiones geográficas dentro de las regiones de tierras bajas (Díaz- Fierros, 2003). Como consecuencia las regiones montañosas acercan zonas climáticas muy distintas entre sí y esto no se debe únicamente al gradiente elevacional, sino también depende de la complejidad del gradiente (Fossa, 2004). Por ejemplo, las laderas orientadas al Este pueden ofrecer condiciones diferentes de las laderas adyacentes que están orientadas al Oeste (Scott , *et al.*, 2002).

Las regiones montañosas presentan una biodiversidad inusual, con alta riqueza de especies que forman centros de endemismo. Las montañas desempeñan diversas funciones para biodiversidad de la tierra que afectan a las tierras bajas vecinas a través del intercambio biótico, los cambios en el clima regional y la esorrentía de nutrientes. Las regiones montañosas más grandes, productivas y topográficamente más complejas no sólo tienen más especies, sino también más mayor proporción de endemismos de montaña. Dado que la tasa de aumento de la riqueza de especies con la superficie, la productividad y la complejidad topográfica difiere entre las regiones montañosas de baja y alta latitud, la pendiente de la relación aumenta desde las regiones templadas y árticas, pasando por las regiones tropicales, subtropicales y árticas hasta los trópicos húmedos.

Por ende, la diversidad actual a lo largo de un gradiente altitudinal puede reflejar procesos evolutivos y ecológicos de larga duración, impulsados por cambios climáticos en paisajes que son de topografía compleja. Esto es de suma importancia ya que la dinámica de la especiación montañosa está en constante fluctuación en conjunto con la adaptación evolutiva, la dispersión, la persistencia y la extinción pueden definir los patrones de diversidad en continentes enteros (Rahbek *et al.*, 2019).

## **E. ¿POR QUÉ ESTUDIAR LA DISTRIBUCIÓN ALTITUDINAL EN LA VEGETACIÓN DE SIERRA DE LAS MINAS Y LA COSTA SURORIENTE DEL PAÍS?**

En la zona Suroriente del país se encuentra una importante área de bosque seco. Estas zonas son de importancia ecológica tanto por las condiciones de aislamiento geográfico que han desarrollado endemismo, así como por sus singulares sistemas productivos que contribuyen a la sostenibilidad financiera de los actores locales, propios de las distintas regiones secas presentes en Guatemala (Trujillo, 2009). La protección de estas zonas es de gran relevancia ya que los bosques secos son de los ecosistemas con mayor degradación de la región y menos representados en los sistemas de áreas protegidas.

En Guatemala, el bosque seco presenta actualmente el 3.67% del país, habiéndose perdido un 75% de su cobertura histórica (CONAP *et al.*, 2011). En este estudio todos los

departamentos que fueron incluidos son parte de las áreas que comprenden la mayor cantidad de las regiones secas (Baja Verapaz, El Progreso, Guatemala, Santa Rosa, Jutiapa, Jalapa, Zacapa y Chiquimula) (CONAP *et al.*, 2011). Específicamente los municipios con las mayores extensiones existentes de sistemas secos en Guatemala son Sansare, Guastatoya, Morazán y San Agustín Acasaguastlán en el departamento de El Progreso; los municipios de Zacapa y Cabañas en el departamento de Zacapa y el municipio de Asunción Mita en el departamento de Jutiapa (Pezo, 2008).

Los bosques en regiones secas representan el 42% de todos los bosques tropicales y subtropicales del mundo (Pennington *et al.*, 2006). Se ha evidenciado que hay una alta riqueza florística en estas regiones y que, a pesar de mantener unidad estructural, poseen diferencias importantes en cuanto a composición de especies vegetales. Se han identificado 1,031 especies de plantas en estas regiones pertenecientes a 135 familias, dentro de éstas existen especies altamente amenazadas (Lavin, 2006).

Sierra de las Minas se encuentra bordeada, tanto al norte como al sur, por dos grandes depresiones que corresponden a las fallas del río Motagua y del Polochic que se formaron durante el Cretácico/Terciario. Sierra de las Minas está formada en su mayoría por rocas paleozóicas así como el levantamiento de una gruesa secuencia de basamentos, con algunas rocas anfibolitas y mármoles. Además es importante mencionar que el límite norte de este cinturón es una falla geológica muy bien definida y con un considerable desplazamiento (Chiquín y Requena, 2001). Además, los suelos de la Sierra de las Minas son los más antiguos de Centroamérica, compuestos principalmente de rocas paleozoicas (Campbell, 1982).

Es una de las regiones con alto endemismo florístico, según Suchi *et al* (2000), ya que la mayor cantidad de especies endémicas se colectaron en el bosque nuboso de la región, además cubre 1,300km, lo que representa la extensión de bosque nuboso más importante de Mesoamérica (Dix, 1983). Por lo que es importante tomar en cuenta las zonas climáticas de la zona que originan una diversidad de paisajes con características propias que a su vez son reservorio de estas especies. Aunado, las especies presentes también pueden variar de manera altitudinal (Suchini *et al.*, 2000).

De igual manera esta zona representa una unidad geomorfológica que se originó a partir de las primeras unidades montañosas que emergieron del mar durante la era Paleozoica (Meschede y Frisch, 1998). Por lo que la geología que conforma esta zona es considerada como una

formación geológica más antigua que el mismo territorio conocido actualmente como América Central y Mesoamérica en su conjunto (Coates, 1997).

Se ha evidenciado que específicamente la zona de Sierra de las Minas es una zona de frontera de especies entre las masas continentales de Laurasia y Gondwana, al haberse formado como un puente entre ambas cortezas y posterior formación de la isla, siendo parte del archipiélago que existía antes de la conformación de Centroamérica compuesta de rocas intrusas y sedimentarias (Donnelly, 1994).

Las variaciones a distintas elevaciones de la biodiversidad de las zonas altas de la cadena montañosa, reflejan la interacción de múltiples mecanismos evolutivos como las mayores tasas de especiación con distintas oportunidades de coexistencia y persistencia de linajes que están determinadas por cambios climáticos a largo plazo interactuando con paisajes topográficamente dinámicos (Fernandez *et al.*, 2007). Además las montañas contribuyen de forma desproporcionada a la biodiversidad terrestre de la Tierra, especialmente la zona de los trópicos, donde se albergan focos de riqueza y diversidad. Así mismo, hay metaanálisis de los gradientes de altitud para plantas que muestran que la riqueza local suele alcanzar su punto máximo en las laderas de las montañas más que en las tierras bajas (Díaz-Fierros, 2003).

Por ejemplo, Myers y colaboradores identificaron las regiones montañosas como una de las más ricas del mundo. Sin embargo la gran mayoría de los estudios sobre la variación a gran escala de la riqueza de especies se han centrado en continentes no tropicales por lo que es imperativo generar estudios de esta índole para las regiones tropicales. La alta biodiversidad y endemismo en estas zonas, tienen en común que alcanzan grandes elevaciones y se caracterizan por configuraciones espacialmente complejas de topografía y vegetación tal como Sierra de las Minas y la costa suroriente de Guatemala (Veliz, 2013).

De igual forma esta alta diversidad en plantas se caracteriza por la agregación de muchas especies con rangos geográficos estrechos, en centros de endemismo a menudo formados por especies filogenéticamente antiguas y recientes (Freire *et al.*, 2004). Por lo que gracias a las especies que están restringidas a regiones montañosas estas zonas son epicentros de alta biodiversidad (Chiquín y Requena, 2001).

Es importante saber que Guatemala, especialmente la zona de Sierra de las Minas es un área donde el aislamiento geográfico y la variedad de elevaciones y clima forman una gran diversidad de hábitat de flora y fauna. Las zonas más altas tienden a estar aisladas unas de otras, por lo que son equivalentes a islas en términos de evolución genética presentando un alto endemismo y diversidad de flora y fauna, siendo conocidas como “ islas de evolución genética” (CECON, 1995). Sierra de las Minas es la segunda área protegida más grande del país, por sus diferentes niveles altitudinales y su ubicación geográfica. Su aislamiento geográfico ha formado estas islas de evolución genética con alto endemismo, lo cual ha sido comprobado por diversos estudios que reportan que esta zona es una de las cinco regiones de mayor endemismo florístico en el país (Freire, 2006).

Otro factor importante para tomar en cuenta es que la posición geográfica de Guatemala y sus variados tipos de ambientes ha generado el interés de comprender cómo los cambios climáticos del Pleistoceno y del Holoceno han impactado sobre la vegetación en la región Neotropical. Esto se debe a que en Guatemala se encuentran especies de flora y fauna de origen Neotropical, Holártico y Pantropical, lo cual genera un mosaico de paisajes de alta diversidad que la paleoecología puede descifrar y permitir a diferentes escalas y patrones (Kerr, 1996).

## **F. MIGRACIÓN DE SPECIES EN GRADIENTES ALTITUDINALES**

La fenología hace referencia al estudio de los períodos de tiempo en que un grupo de organismos presenta alguna etapa dentro de su ciclo de vida, como comportamientos reproductivos o procesos de migración (Schwartz, 2013). Los gradientes altitudinales, como las montañas o cerros, funcionan como una herramienta heurística para probar patrones en la naturaleza, tales como: la relación entre la diversidad de especies y el clima, o la variación de la vegetación con la latitud. Estos eventos se suelen asociar con variables climáticas y otros factores ambientales tanto abióticos como bióticos (Diffenbaugh y Field, 2013). Para el caso de las plantas, se tienen en cuenta principalmente aquellos periodos en los que hay producción de hojas, flores, frutos y/o semillas. Sobre esto, se evidencia que los eventos fenológicos pueden ocurrir tanto de manera

continua, como de manera periódica. Los factores abióticos pueden dispersar o estimular los eventos fenológicos (Dorsey et al., 2018).

El efecto de los gradientes altitudinales sobre la diversidad y composición de las comunidades, se manifiesta mediante una tendencia general para diversos grupos en la riqueza de especies, la cual disminuye a mayores elevaciones (Stevens, 1992). Debido a que en los gradientes se presenta una gran variedad de climas en los cuales se desarrolla una biota adecuada lo que genera cambios en la riqueza y diversidad de especies por efecto de la altitud (Veliz, 2013). Se ha demostrado que la vegetación perteneciente al sistema montañoso, como la vegetación alpina, responde con procesos migratorios altitudinales por el aumento de la temperatura.

De cumplirse este supuesto las especies de alta montaña estarían destinadas a la extinción. En estos ecosistemas donde pueden existir variaciones climáticas drásticas cortas, los desplazamientos de las especies inducidos por el cambio climático tienden a ser hacia diferente altitud, lo que implicaría desplazamientos más largos (Shaw y Davis, 2001). Pauli *et al.* (2002) señalan que para la vegetación alpina se pronostican cambios fenológicos en su establecimiento, a tal grado que provocarían su extinción así como la invasión de especies de elevaciones menores. Dudley (1998) señaló que los grupos de mayor potencialidad e invasoras son las especies arbóreas y leñosas ya que requieren de procesos con periodos más largos.

Claramente las evidencias indican que las especies vegetales responden a procesos migratorios altitudinales, por lo que se considera de gran importancia conocer qué está sucediendo principalmente con las zonas montañosas, ya que son ecosistemas frágiles y se consideran como las más vulnerables ante los efectos del cambio climático. Como lo señalan Romero *et al.* (2010), en México se interponen sitios con climas muy secos y cálidos en las posibles rutas de migración que seguirían las especies de montaña, cuando migran hacia sitios más fríos de mayor latitud, el cual se convierte en un serio obstáculo probablemente difícil de pasar para muchas especies.

### III. JUSTIFICACIÓN

Guatemala posee una biodiversidad alta en Mesoamérica, región que alberga entre 7 y 10% de las formas de vida conocidas del planeta y ocupa el segundo lugar de las regiones con mayor diversidad de especies y endemismo (Gillson, 2016). Dado a estas características singulares de la región es importante implementar estudios que permitan tener una mejor comprensión de la variabilidad que pueden tener las especies vegetales ante distintos factores ambientales, sobre todo ante un escenario de cambio climático acelerado. Ya que la magnitud de los cambios en el clima a nivel global puede afectar severamente la distribución de las especies, alterar la composición de la vegetación actual y los procesos de regeneración de las especies como han sucedido en el pasado (Huntley et al., 2006). Además, las principales áreas afectadas como consecuencia del cambio climático serán las zonas montañosas (Valladares et al., 2014), siendo esto el mayor problema actual en las alteraciones ecosistémicas, debido a los cambios en la temperatura global que ahora se dan de manera más rápida, por el aumento desmedido de las actividades antropogénicas que afectan el planeta (Primack, 2010).

Esto es alarmante ya que la Zona de Sierra de las Minas en conjunto con la costa suroriente abarca uno de los sitios más importantes para la conservación del bosque nuboso en Centroamérica. La composición de 9 zonas de vida que contienen especies reconocidas como registros fósiles del Mioceno y Oligoceno, tienen más similitud con especies del neártico, pero se encuentran en un ambiente neotropical, conformando un paisaje único en el istmo centroamericano (Ramirez, 2007). La variedad de microclimas, diferentes tipos de bosques, diversidad biológica, extensión territorial, atmósfera y estructura geológica, hacen de esta zona un extenso territorio escénico que se traduce en un componente ecosistémico único para la región.

En relación con este tipo de estudios, una de las primeras propuestas de clasificación de ecosistemas utilizando información bioclimática en el país fue impulsada por Leslie Holdridge. Ella desarrolló un sistema de clasificación denominado “zonas de vida”. Las zonas de vida se definen como las unidades climáticas naturales en las cuales se agrupan diferentes asociaciones que corresponden a determinados ámbitos de temperatura, precipitación, humedad y biotemperatura. Hansen (1920), citado por Good (1964) estableció una relación directa entre el clima y la distribución de los tipos de vegetación en torno a determinados rangos latitudinales. Así,

Hansen (1920) sugirió que los paisajes naturales cambiarían en la medida que exista una disminución de la temperatura promedio anual, en gradientes que van desde el ecuador hacia ambos polos del globo terráqueo. Además, Hansen mencionaba que existían cambios en los tipos de vegetación según el ritmo de disminución de la temperatura desde el nivel del mar hacia altitudes mayores (Good, 1964).

A partir de estos análisis y de sus propias observaciones, Holdridge revisó la dinámica de la interacción y modificó según Villar utilizando básicamente los valores anuales de precipitación pluvial y de calor. De igual forma existe la clasificación por biomas, éste consiste en la agrupación más o menos numerosa y extensa de ecosistemas terrestres que mantienen entre sí relaciones estructurales y funcionales claramente definidas. Tomando en cuenta condiciones como la posición geográfica, la temperatura y la precipitación (Diffenbaugh y Field, 2013).

Bajo esta línea busco también unirme a los esfuerzos de Avendaño, (2012) y López, (2019). Buscando realizar estudios de calibración y paleoecología en Guatemala, como Islebe (1995) y Correa et al. (2011) etc. Ya que se necesita realizar estudios de este tipo para mejorar las investigaciones de palinología, paleo palinología, paleoecología, biología de la polinización, ciencias alérgicas, biogeografía, taxonomía, entre otros. En Guatemala existen muchos vacíos de información en cuanto a este tipo de investigaciones, en particular sobre la composición vegetal en los gradientes bio-geofísicos del país. Por esta razón, es de suma importancia generar información que llene estos vacíos de conocimiento.

De igual manera Guatemala y su compleja topografía, geología, etc. desempeña un papel importante como fuente de nuevos linajes evolutivos y biodiversidad, debido a que puede funcionar como refugios para especies adaptadas a las condiciones específicas, puntos de conectividad o como corredores de dispersión durante los climas fluctuantes (Shaw y Davis, 2001). De igual forma, el impacto de las regiones montañosas y estudios a lo largo de un gradiente altitudinal va más allá de sus límites topográficos, por lo que estos resultados pueden dar pauta para estudios más completos a nivel mesoamericano.

Finalmente generar información para esta zona es importante debido a las constantes amenazas que presenta, algunas de las principales amenazas es la deforestación, avance de la

frontera agrícola, contaminación por desechos líquidos y sólidos, incendios forestales, extracción ilegal de recursos no maderables, actividades mineras, inadecuadas prácticas agrícolas, impacto negativo de actividades agroindustriales, deslizamientos, plagas forestales y monocultivos extensivos de palma africana y hule (CONAP, 2014). Ante estas eminentes amenazas se necesita generar estudios que permitan conocer la dinámica actual de las especies para poder implementar planes de manejo más efectivos y certeros, que eviten que los ecosistemas se degraden y se pierda la biodiversidad alta que existe.

## **IV. OBJETIVOS**

### **A. OBJETIVO GENERAL**

Analizar los cambios en la composición del origen fitogeográfico de la vegetación en el gradiente altitudinal de Sierra de las Minas- Costa Suroriental en Guatemala (GASMCS) con bases de datos de GBIF.

### **B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar los principales factores que influyen en los pisos ambientales estudiados.
- Generar una explicación de la posible relación entre el origen fitogeográfico de la vegetación presente y la distribución espacial.
- Depurar y generar una base de datos con registros florísticos a partir de información obtenida en las bases de datos de GBIF.
- Generar una metodología y protocolo para el análisis de gradientes altitudinales con datos de GBIF.

## **V. HIPÓTESIS**

La composición vegetal en el gradiente altitudinal de Sierra de las Minas costa Suroriente en Guatemala va a ser dominado por especies de origen Laurásico en los pisos más altos, Gondwaniano en los pisos más bajos y se espera una mezcla entre ambos en los pisos medios.

## VI. MÉTODOS

### A. METODOLOGÍA

#### 1. ÁREA DE ESTUDIO

El Gradiente Altitudinal Sierra de las Minas a Costa Suroriente (GASMCS) incluye desde la parte más alta de la Reserva de Biósfera Sierra de las Minas hasta la costa Suroriente de Guatemala. La Reserva de Biósfera Sierra de las Minas está ubicada en el nororiente de Guatemala, entre los valles del río Polochic y el río Motagua. Forma parte de una cadena montañosa que ocupa parte de cinco departamentos de Guatemala. Además, dentro de este estudio los departamentos incluidos fueron: Baja Verapaz, El Progreso, Guatemala, Santa Rosa, Jutiapa, Jalapa, Zacapa y Chiquimula. Únicamente el área de Sierra de las Minas ocupa un área de 242,646 hectáreas de extensión, aunado la región nor-oriente tiene aproximadamente una extensión territorial de 16,026 km<sup>2</sup> por lo que aunado al resto de área de estudio la extensión es bastante amplia representando aproximadamente un tercio del país (Figura 1).

La zona se caracteriza por tener una precipitación estimada entre los 700 y 3,000 mm anuales para Sierra de las Minas, disminuyendo en las zonas de la costa y cercanas a la misma, por lo que hay una heterogeneidad alta en cuanto a variables climáticas; tales como temperatura, humedad, microclimas, etc.

La depresión oeste-este de la Sierra, juega un papel muy importante en el patrón de precipitación del Valle del Motagua. Las cordilleras altas crean condiciones de sombra de lluvia, lo que repercute que en el valle medio del Motagua se reporte una precipitación anual de menos de 500mm (Campbell, 1982), siendo entonces el valle más árido y seco de Centroamérica.

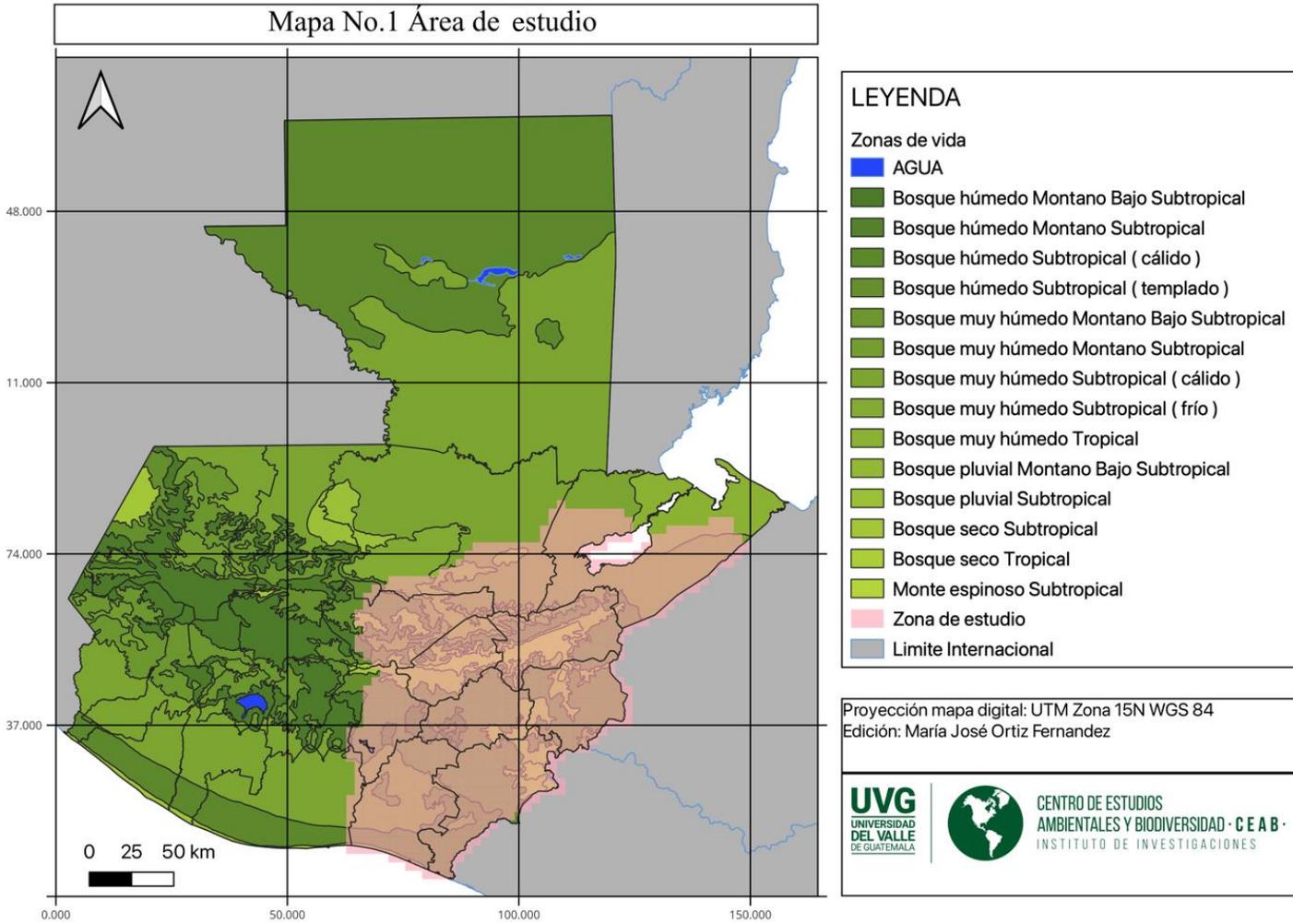
La vegetación es una mezcla de asociaciones neárticas y neotropicales con una alta presencia de coníferas, robledales y poblaciones diversas de lauráceas con abundantes asociaciones de musgos, helechos y epífitas (Marroquín et al., 1991). La mayor cantidad de bosque primario existente en la reserva está constituido por bosque nuboso y latifoliado, localizado en las partes más altas de la Sierra. Además la zona indica cinco zonas de vida. Además están presentes los bosques

tropicales, esta comunidad se caracteriza por presentar especies arbóreas tales como: *Inga micheleana*, *Asophila salvinii*, *Tillandsia sp.*, helechos, musgos, cactus, aráceas, entre otras (CDC, 1993).

El resto de la región Nor-oriental es resultado de los períodos de sumersión y emersión originados hace 500 millones de años. La formación de montañas y fallas que hoy forman la región inicio hace 250 millones de años, sobresaliendo tres zonas de fallas: Polochic, Motagua y la falla Chamelecón Jocotán (Castillo *et al.*, 2003). La zona presenta zonas de montaña y un par de tierras bajas bien definidas. La zona de montañas se divide en dos sistemas orográficos separados por la falla del Motagua y que poseen historias geológicas independientes.

En general, Guatemala es una ruta migracional que ha funcionado como un filtro en la dispersión de las especies de Norte y Sur América, hecho que la ha consituído en un país biológicamente rico. Su relieve y microclimas locales han contribuido a la formación de “islas de refugio silvestre” y áreas endémicas, como la Sierra de las Minas, Trifinio y la Sierra del Merendón. La región es eminentemente forestal ya que 55.1% (27% bosque productor y 28.2% de bosque protector) (Castillo *et al.*, 2003).

**Figura 1.** Mapa zona de estudio y zonas de vida de Guatemala.



## 2. PROCESAMIENTO DE DATOS

Se realizó una búsqueda exhaustiva de estudios florísticos en la zona de GASMCS, se depuró a un total de 14 estudios que cumplieran con la información de colecta necesaria; tales como la relación entre presencia de especies vegetales y coordenadas específicas. Esto eliminó la mayoría de los trabajos ya que muchos no especificaban coordenadas exactas para sus sitios de muestreo. Por eso tuve que realizar una modificación al criterio y ampliarlo para poder trabajar con los estudios que tomaran en cuenta elevación altitudinal o un sistema de coordenadas geográficas para sus datos. En el caso de estudios que únicamente presentaban elevación del sitio. Únicamente utilicé la presencia y ausencia de plantas dentro del gradiente altitudinal. El último criterio fue el nivel de clasificación taxonómica, ya que muchos estudios únicamente presentaban datos hasta el nivel de género y no presentaban el epíteto específico. Después de filtrar la información, pasé de un total de 25 estudios a un total de 13 estudios que pude utilizar (Cuadro 1).

**Cuadro 5.** Resumen de estudios utilizados para realizar el análisis fitogeográfico del Gradiente Altitudinal Sierra de las Minas a Costa Suroriente.

| Fuente                | Tipo de estudio | Lugar   | Elevación (msnm) |
|-----------------------|-----------------|---|------------------|
| Estrada, 1999         | Tesis           | Sierra de las Minas   | 1200 a 2200      |
| Gonzales, 1999        | Tesis           | Sierra de las Minas   | 400 a 1200       |
| Villatoro, 1999       | Tesis           | El progreso   | 400 a 2800       |
| Valle, 1996           | Tesis           | Zacapa  | 300-2400         |
| Rosario et al., 2020  | Informe         | El Progreso   | 600-2100         |
| Cobar, 2010           | Tesis           | El progreso, Chiquimula   | 300-1600         |
| Rosito, 1999          | Tesis           | El Progreso, Baja Verapaz, Alta Verapaz, Zacapa                       | 2300-2965        |
| Veliz, 2013           | Informe         | El progreso, Jalapa, Zacapa, Chiquimula, Jutiapa, Sierra de las Minas | 100-3000         |
| Muccio, 2010          | Plan de manejo  | Chiquimula  | 100              |
| Hernandez, 2012       | Informe         | Chiquimula  | 0-800            |
| Pardon y Burgos, 2012 | Informe         | Sierra de las Minas, Santa Rosa                                       | 0-1100           |

**Cuadro 6.** Continuación resumen de estudios utilizados para realizar el análisis fitogeográfico del Gradiente Altitudinal Sierra de las Minas a Costa Suroriental

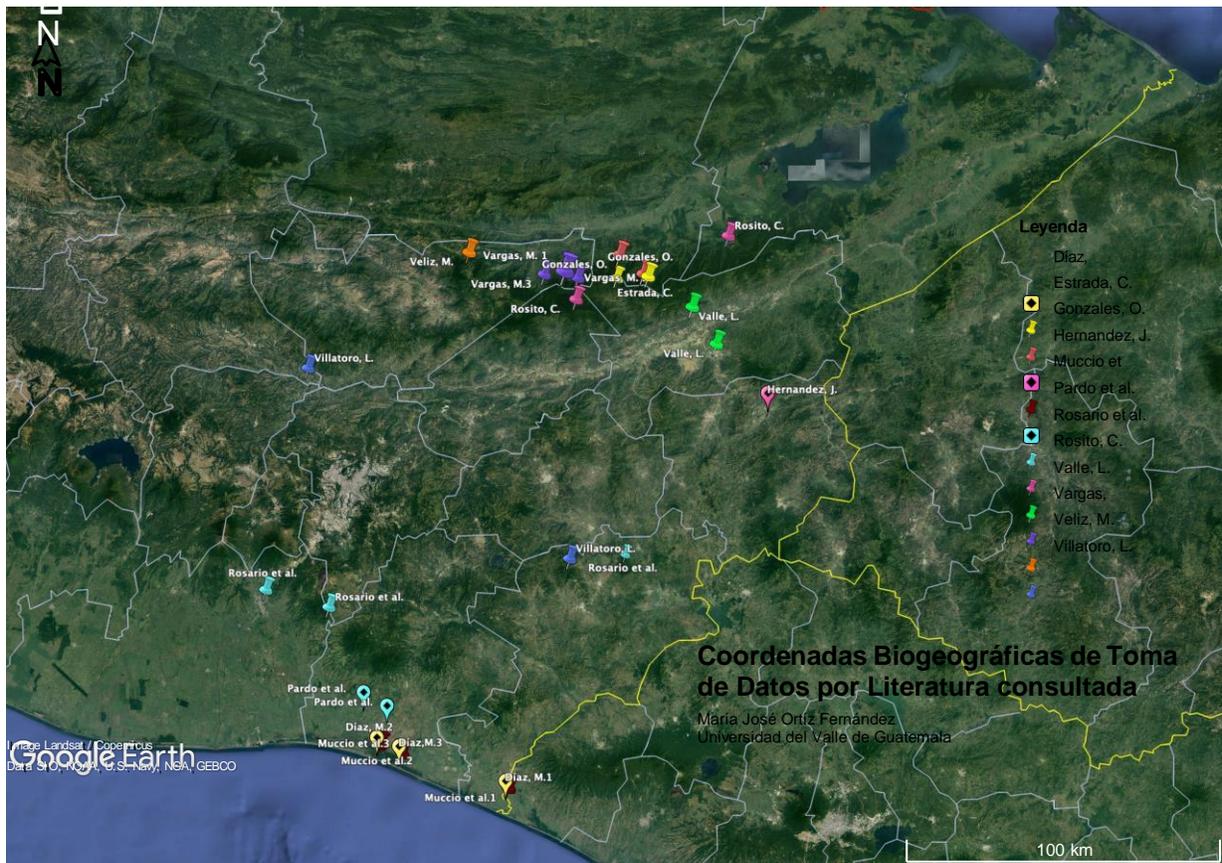
|              |         |                     |           |
|--------------|---------|---------------------|-----------|
| Díaz, 2021   | Informe | Santa Rosa          | 0-100     |
| Vargas, 1999 | Tesis   | Sierra de las Minas | 1700-2900 |

Debido a las actualizaciones recientes en la taxonomía de plantas, revisé la nomenclatura más reciente para poder utilizar la clasificación fitogeográfica de Gentry (1982). Para esto revise las bases de datos “*Tropicos*” (Missouri Botanical Garden, 2020) y “*Angiosperm Phylogeny Website*” (Stevens, 2007) principalmente. Una vez terminada la revisión taxonómica realicé una base de datos dónde incluí un código único para cada especie encontrada, origen fitogeográfico, hábito, familia, nombre taxonómico actual y la elevación a la que fue registrada en rangos de 100 m. El código para cada especie fue la primera letra del género y las primeras tres letras del epíteto específico.

El origen fitogeográfico lo dividí en cinco categorías según la clasificación de Gentry (1982): Laurásico (1), Amazónico (2), Andino Norte (3), Andino Sur (4) y Misceláneo (5). Para el hábito de la especie utilicé cinco categorías: Árbol (1), Arbusto (2), Arbusto a Árbol (3), Hierba (4) y Acuática (5). Para la presencia o ausencia de las especies en el rango altitudinal, dividí en rangos de 100 metros desde 0 msnm hasta 3900 msnm. Si la especie se encontraba en dicho rango, coloque un uno (1), si la especie no se encontraba en dicho rango colocaba un cero (0). Esta división se utilizó en el estudio realizado por Avendaño (2012) y López (2019) como una ventana de búsqueda de patrones que se ajusta a la naturaleza de los datos.

Sin embargo, en la base de datos encontré un vacío de información bajo los criterios de depuración utilizados. Al realizar un mapa de la distribución de los datos que brindaron los estudios, se pudo observar que hubo una segregación de los datos en las zonas más altas y bajas del área de estudio (Figura 2), concentrándose en el área de Sierra de las Minas y las zonas de Jutiapa, Santa Rosa y Escuintla. Esto presenta un reto para el estudio y la recopilación de datos ya que los estudios no cubrían de forma más o menos homogénea toda la zona.

**Figura 2.** Coordenadas biogeográficas de la toma de datos por literatura consultada.



Por lo que se optó obtener los datos de la base de datos Global Biodiversity Information Facility (GBIF). Se delimito la búsqueda a el reino *Plantae* para luego en el área de registros se realizó una búsqueda avanzada. En el área de ubicación se delimito a Guatemala, luego se dibujó un polígono delimitando el área de estudio. Para la depuración de esta base de datos se utilizó el mismo criterio de la primera base realizada, sin embargo, se tuvieron que agregar nuevos criterios debido a la inmensidad de datos. Primero se tomaron únicamente los datos de especies que tenían como mínimo dos registros de individuos por especie en el área no tenían coordenadas completas y los que únicamente incluían hasta género.

#### 4. TRANSFORMACIÓN DE DATOS Y ANÁLISIS

Se observó si dentro del gradiente altitudinal GASMCS existen asociaciones vegetales que se agruparan en diferentes conjuntos denominados pisos altitudinales dentro del gradiente altitudinal. Para todos los análisis estadísticos se utilizó el programa Past 4.0 (Hammer et al. 2001). Posteriormente se definieron los pisos altitudinales utilizando presencia o ausencia de cada especie en rangos de 100 metros sobre el nivel del mar. Se realizó un Análisis de Correspondencia sin Tendencia (DCA por sus siglas en inglés); para estudiar las relaciones existentes entre la presencia o ausencia de las especies vegetales a lo largo del gradiente altitudinal. Dicho análisis se utiliza para describir relaciones en gradientes heterogéneos, a través de la normalización de los datos generalmente en dos ejes (Holland, 2008). El análisis llevó dos pasos algorítmicos de álgebra de matrices, el primero, estira los datos en un eje; y el segundo, los dispersa para observar agrupamientos (Hammer *et al.* 2018). El DCA produce valores tanto para las especies como para las muestras, por eso se llama de correspondencia (Hill y Gauch, 1980). Los valores de las especies indican la posición relativa del taxón en un espacio reducido con respecto a su variación en el gradiente (Correa *et al.* 2014).

El DCA produce valores tanto para las especies como para las muestras, por eso se llama de correspondencia (Hill y Gauch 1980). Los valores de las especies indican la posición relativa del taxón en un espacio reducido con respecto a su variación en el gradiente (Correa *et al.* 2014). El significado de los ejes del DCA es inferido al evaluar la posición relativa de las especies en términos de lo que se conoce de la distribución de las especies (Holland 2008). Este análisis auxilia al investigador a definir el significado ambiental de los ejes y a su vez, definir los espacios ecológicos delineados por los ejes ordinales (Legendre y Legendre 1988). Estos valores asignados por el DCA se conocen como “eigen” (i.e. valores característicos), los que muestran el total de la variación explicada por un eje del componente (Holland 2008) (Hammer *et al.* 2018). Una vez realizado dicho análisis, tomé los eigen valores del eje 1 y los asocié con la información de elevación de los sitios a través de un análisis de regresión lineal, y así observar la relación con los datos obtenidos en el gradiente altitudinal.

Aunado se realizó análisis de Componentes principales (PCAs por sus siglas en inglés) permitiendo simplificar la complejidad de espacios muestrales con muchas dimensiones a la vez que conserva información (Witten, 2021). Sin embargo, por la naturaleza de los datos las agrupaciones no pudieron observarse por lo que se realizaron depuraciones en las bases de datos por agrupaciones observadas en la gráfica con el fin de observar que parcelas se agrupaban entre sí. A pesar de esto los eigen valores representaron muy poca variabilidad, por lo que no se logró ver la tendencia de datos bajo estos análisis.

Al no observar un patrón determinado con la base de GBIF se decidió hacer una modificación en la base de datos para un óptimo análisis a partir de códigos de R. student (versión 3.0.0.) Para esta base de datos en el programa de QGIS se necesitó realizar parcelas. Por lo que se generaron parcelas de forma aleatoria dentro del área de interés. Se realizaron pruebas de parcelas de 100, 200, 300 y 500m<sup>2</sup>. Sin embargo se observó que la menor pérdida de datos se obtenía con parcelas de 500 m<sup>2</sup>. Aunado se tuvieron que hacer ajustes a la base para poder ser analizada a partir de códigos de R. student (versión 3.0.0.).

Por lo que primero se realizó en QGIS un área de interés. Para la creación del área de interés se utilizó el shapefile de municipios y se hizo la selección de aquellos municipios que contenían al menos un punto de las colecciones del GBIF. Posterior a la selección de los municipios se extrajeron estos municipios para luego aplicar un “Dissolve” esto permitió que quedara un área homogénea. Posterior se buscó crear los pisos altitudinales para la creación se utilizó el modelo de elevación digital de Guatemala, el cual fue recortado con el shapefile del área de interés. Posterior al recorte con el área de interés se crearon los pisos altitudinales con una distancia de separación cada 100 metros, esta permitió identificar 32 pisos altitudinales. Posterior a establecer los pisos, se reclasificaron para obtener un raster con 32 categorías.

Después se realizó una malla en el área de interés la malla fue de 5km x 5km utilizando el complemento de Arcgis llamado “Fishnet”. Luego se utilizó el shapefile de área de interés para establecer el área en donde se iban a crear la malla o cuadrante. Posterior se crearon puntos aleatorios, utilizando el complemento de Arcgis “Random Points”, en donde se utilizó el shapefile de los cuadrantes para crear 30 puntos aleatorios dentro de cada cuadrante. Esto dio como resultado un total de 34,470 puntos o parcelas. Con los puntos aleatorios se realizaron buffers. Para crear el

buffer de los puntos aleatorios, se utilizó el complemento de Arcgis llamado “Buffer” y se utilizó una distancia de 500 metros para cada uno de los puntos de cada uno de los cuadrantes.

Se tuvo que realizar una transformación de buffer redondo a buffer cuadrado utilizando el complemento de Arcgis llamado “*Feature Envelope to Polygon*” lo cual hace que pase de una figura de círculo a una figura de cuadrado. El siguiente paso fue utilizar el complemento “Clip” para extraer los puntos del GBIF que se encontraron dentro de cada una de las parcelas de los puntos aleatorios, esto permitió seleccionar 3,527 parcelas de un total de 4,990. Por último, se procedió a realizar una unión espacial entre los datos del GBIF recortados con la información de las parcelas aleatorias con el fin de que se pudiera conocer el número de la parcela que contiene a cada uno de los puntos de GBIF.

## 5. ÍNDICES DE SIMILITUD

En relación con los índices, se utilizó el de Jaccard, que cuantifica similitud según especies compartidas entre sitios. También el índice de similitud de Manhattan, el cual se analiza la suma de las diferencias entre cada variable. En este caso, las variables fueron la presencia y ausencia de las especies presentes en cada rango altitudinal. Por último, el índice de similitud de cuerda analizó la distribución de datos en función de un área circular (Hammer *et al.* 2018). Sin embargo, el único análisis que permitió identificar pisos altitudinales claros fue el análisis de Manhattan. Por lo que la generación de pisos altitudinales se realizó a partir de dicho índice de diversidad. Para la definición de los pisos se utilizó el criterio usado por Shuster y Cano 2000 donde usaron los datos binarios de presencia/ausencia y fue sometido a el índice de similitud para luego con el agrupamiento jerárquico obtenido generar los grupos de Passalidos a analizar, con la similitud de los nodos. A partir de dicho criterio se generaron los cortes en los nodos y se obtuvieron un total de 26 pisos específicos en tres grandes grupos. Los tres grandes grupos fueron identificados como: Costa Sur, Centro Seco y Sierra de las Minas.

Una vez establecidos los pisos ambientales, con el programa Excel ©, se realizó una figura del porcentaje de frecuencia de especies según su origen fitogeográfico encontradas en cada piso altitudinal. Así mismo se generaron cajas de bigotes y análisis de correlación para cada uno de los

pisos con las variables de altitud, temperatura, humedad, precipitación y geología de la zona. Finalmente, con el programa de edición de mapas Qgis© se realizó una edición de mapas para los 3 grandes grupos y con los 26 pisos de Guatemala se realizaron mapas con las capas de las Zonas de Vida, geología, precipitación, humedad y un mapa de los pisos altitudinales en el área de estudio (López, 2019). Con el fin de determinar visualmente un patrón con dichas variables y la distribución de los 26 pisos.

## **6. ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN DE ESPECIES ENDÉMICAS**

Se realizó un análisis para evaluar si hay una relación de la presencia de especies endémicas con la distribución de pisos. Por lo que se generó un listado de especies endémicas basado en la investigación “DETERMINACIÓN, CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DEL ESTADO ACTUAL Y USO DE LAS ESPECIES ENDÉMICAS DE GUATEMALA” realizado en el 2013 por el investigador Veliz y colaboradores.

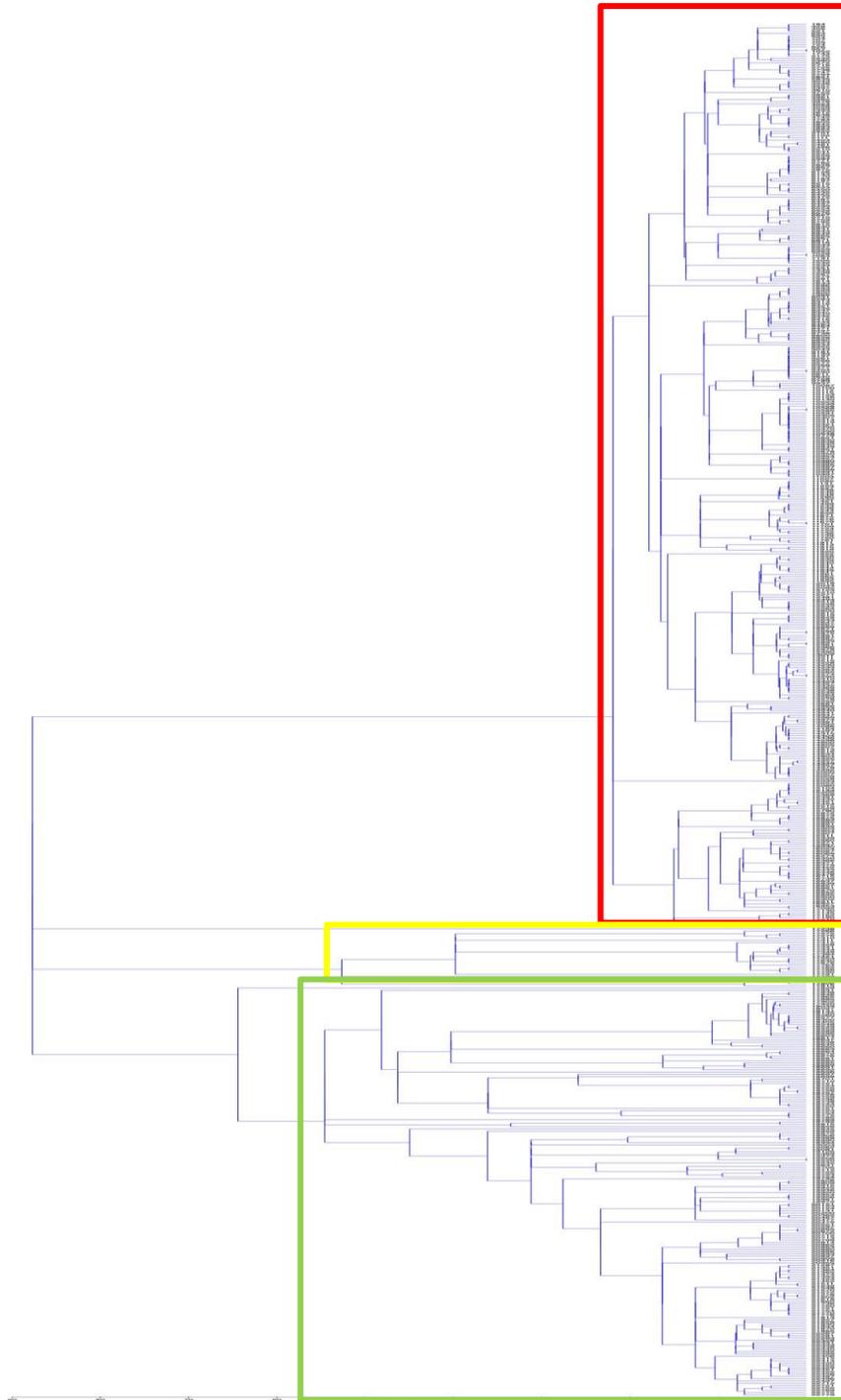
A partir de este estudio se generó una base con las especies endémicas encontradas en la zona de estudio GASMCS. Con base en los datos del estudio y el listado de especies endémicas extraído de Veliz, 2013 se generó a partir de códigos (Apéndice 2 y 3) en R Studio versión 3.3.0. una nueva base de datos donde se identificó dentro del estudio que especies son endémicas del lugar. A partir de dicha base se generó un mapa en Qgis para identificar la distribución de especies endémicas en cada parcela. Aunado se generó una gráfica de barras con las especies endémicas presentes en cada piso para identificar qué piso tuvo mayor dominancia de especies endémicas, así como el origen fitogeográfico que dominó.

## VII. RESULTADOS

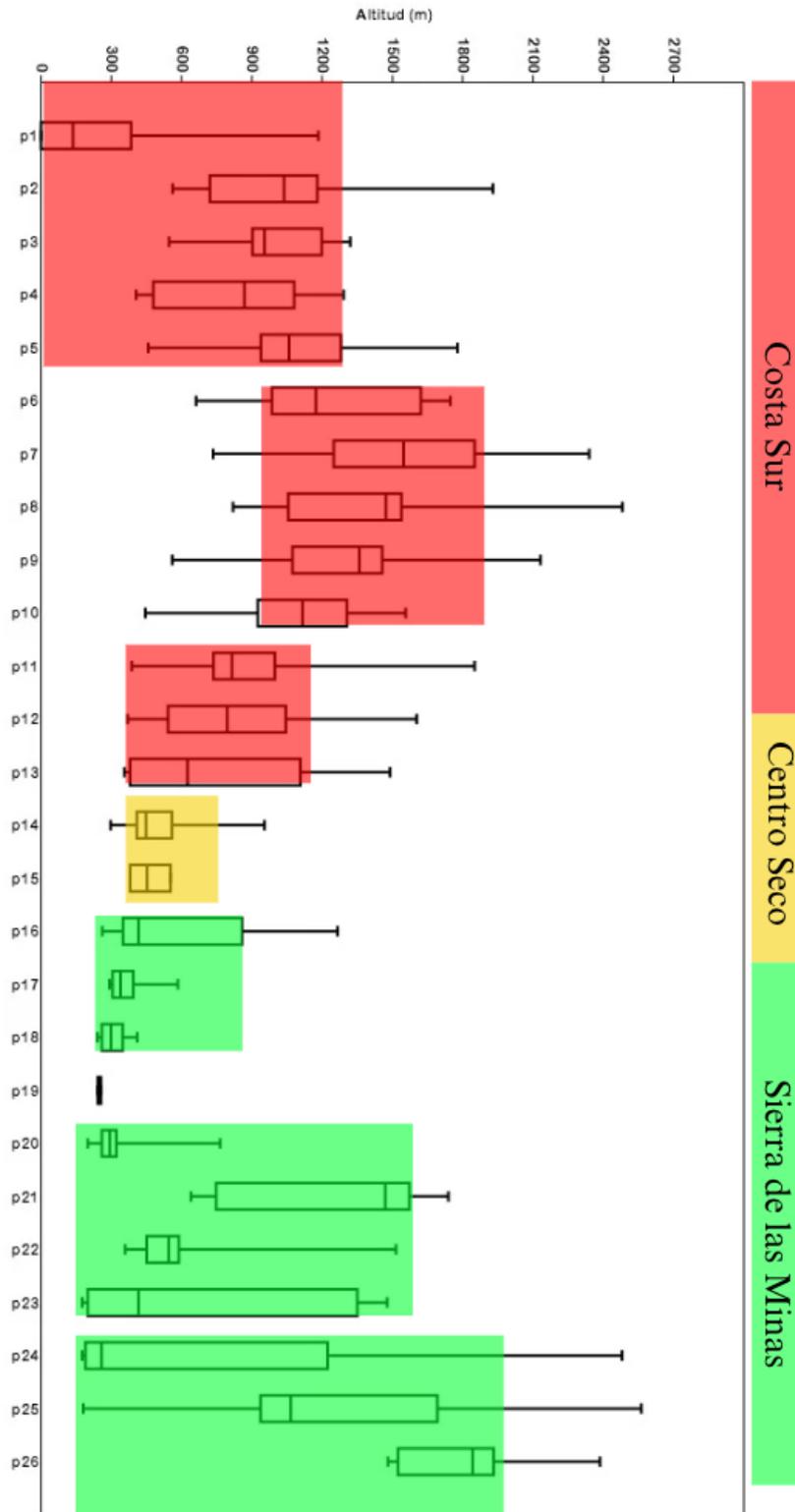
Para establecer los pisos altitudinales del gradiente, utilicé datos del Análisis de Conglomerado con el índice de similitud de Manhattan. En la Figura 3 muestro el resultado del análisis de conglomerado. En este se puede observar un patrón de agrupación de tres grandes grupos (Cuadros rojo, amarillo y verde) desde los 0 msnm hasta los 3500 msnm. Estos tres grandes grupos los llamé Piso Costa Sur (rojo), Piso Centro Seco (amarillo) y Piso Sierra de las Minas (verde). Los tres grandes grupos engloban 26 subgrupos específicos con rangos de altitud variados. Por lo que de forma más detallada en la Figura 7 se observa un análisis de caja de bigotes con la media de las alturas para cada uno de los 26 pisos así como en el Apéndice 1.

## A. DEFINICIÓN DE LOS PISOS AMBIENTALES

**Figura 3.** Análisis de conglomerado para la relación de plantas según su origen y el gradiente altitudinal Sierra de las Minas Costa Suroriente de Guatemala utilizando el índice de similitud de Manhattan. Color rojo: Grupos Costa Sur, amarillo: Grupo Centro Seco, verde: Sierra de las Minas.



**Figura 4.** Análisis de caja de bigotes para los 26 pisos generados y la altitud del Gradiente de Sierra de las Minas Costa Suroriente de Guatemala. Color rojo: Grupos Costa Sur, amarillo: Grupo Centro Seco, verde: Sierra de las Minas.



## B. ANÁLISIS FITOGEOGRÁFICO DE PISOS

Una vez establecidos los pisos altitudinales se determinó la riqueza de especies y abundancia de individuos presentes en cada uno de los pisos (Ver Cuadro 2). Así mismo se analizó el porcentaje de familias presentes en cada piso dependiendo de su origen fitogeográfico (Ver Figura 9). En rasgos generales, se observó que existe una mayor frecuencia de plantas de origen Laurásico en los pisos más bajos y altos. Después fueron las especies de origen Amazónico las más frecuentes. Las plantas de origen Andino Norte son de más amplia distribución ya que se encuentran presentes en casi todo el gradiente, pero de forma menos dominante. Las especies de origen Misceláneo dominan únicamente en los pisos medios con frecuencias bajas, mientras que las especies de Andino Sur están presentes a lo largo de todo el gradiente, pero no dominan en ninguno de estos.

En los tres grandes grupos se observó que tanto en el grupo de la Costa Sur como en el de Sierra de las Minas dominan las especies de origen Laurásico, que en el grupo del Centro Seco son las especies de Andino norte y Amazónico. Mientras que de manera más específica la frecuencia de presencia en el piso 1 es dominada por el origen Amazónico, el piso 2 está dominado por especies de Andino Norte, el piso 3, 4 y 5 Laurásico, piso 6 Andino Norte, pisos 7 al 12 Laurásico, 13 origen Misceláneo, el piso 14 Andino Norte, piso 15 Amazónico, 16 Laurásico, 17 y 18 Amazónico, 19 Misceláneo, 20 Amazónico, 21 Andino Norte, 22 Laurásico, 23 Andino Norte, 24 y 25 Laurásico y finalmente el piso 26 es dominado por especies de origen Andino Norte (Figura 5).

Evidenciando una relación en cuanto a las familias de plantas presentes tanto en los primeros pisos como en los últimos. En la Figura 6 también se observa qué pisos fueron los más ricos en cuanto a la presencia de especies. Se observa que los pisos más bajos tienen los valores de riqueza más altos. Los pisos con valores de riqueza más altos fueron el piso 5 (23 *sp.*) seguido del piso 1 (22 *sp.*), 7 (21 *sp.*) y el 9 (20 *sp.*). Siendo el piso con menor riqueza el piso 20 (1 *sp.*) 16 (2 *sp.*), 19(2 *sp.*), 17(3 *sp.*), 24(4 *sp.*).

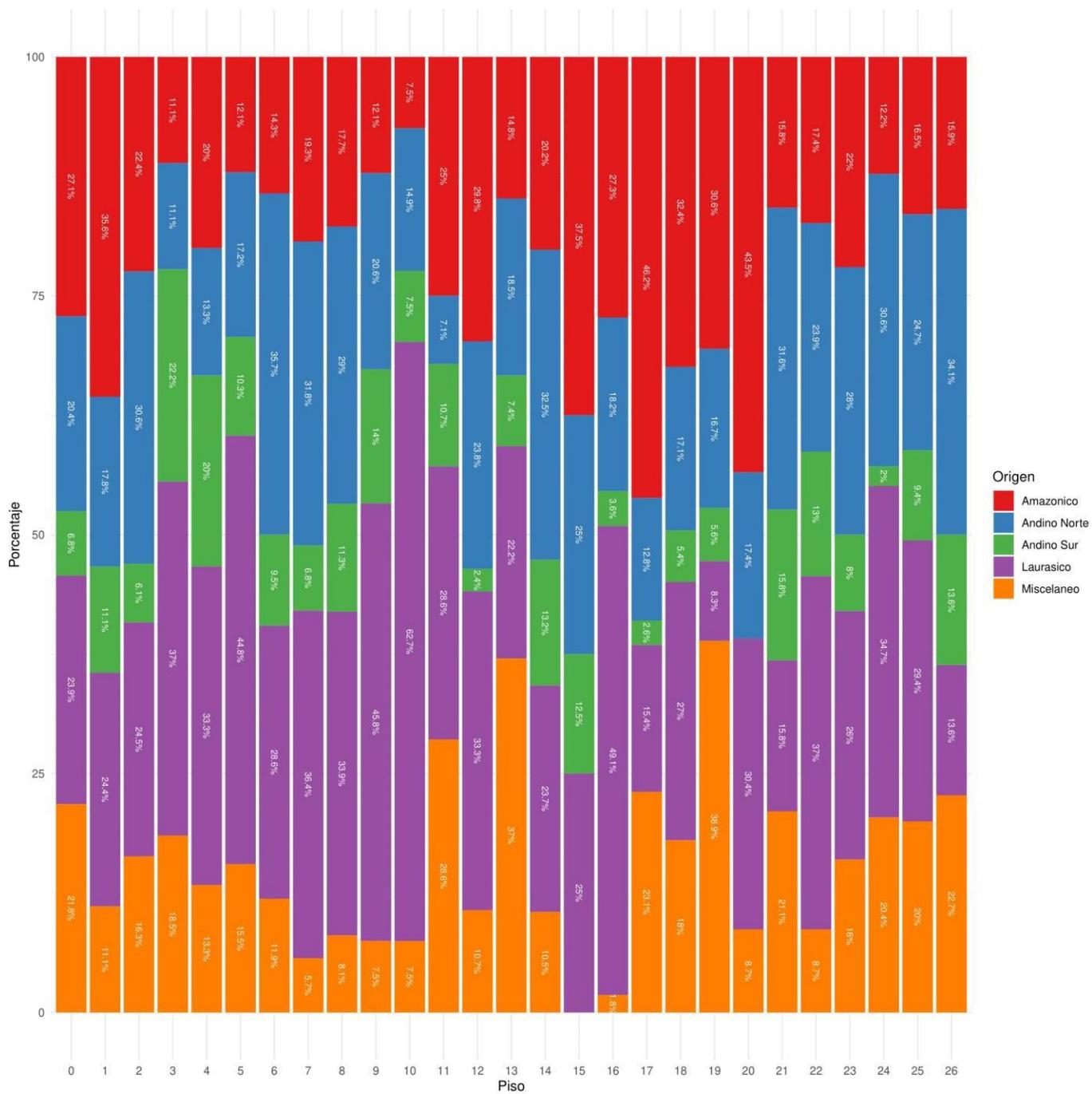
**Cuadro 7.** Riqueza, abundancia y el origen dominante de los 26 pisos del Gradiente ambiental Sierra de las Minas a Costa Suroriente(GASMCS).

| <b>No. de piso</b> | <b>Rango de altitud (msnm)</b> | <b>Riqueza</b> | <b>Abundancia</b> | <b>Origen dominante</b> |
|--------------------|--------------------------------|----------------|-------------------|-------------------------|
| 1                  | 1 -1184                        | 22             | 45                | Amazónico               |
| 2                  | 562-1929                       | 15             | 98                | Andino Norte            |
| 3                  | 547-1321                       | 8              | 81                | Laurásico               |
| 4                  | 406-1292                       | 5              | 60                | Laurásico               |
| 5                  | 428-1700                       | 23             | 290               | Laurásico               |
| 6                  | 662-1749                       | 11             | 252               | Andino Norte            |
| 7                  | 734-2341                       | 21             | 616               | Laurásico               |
| 8                  | 820-2482                       | 19             | 496               | Laurásico               |
| 9                  | 561-2133                       | 20             | 963               | Laurásico               |
| 10                 | 445-1557                       | 8              | 670               | Laurásico               |
| 11                 | 388-1852                       | 2              | 308               | Laurásico/ Misceláneo   |
| 12                 | 370-1604                       | 14             | 1008              | Laurásico               |
| 13                 | 356-1591                       | 5              | 351               | Misceláneo Anaranjado   |
| 14                 | 290-954                        | 14             | 1596              | Andino Norte            |
| 15                 | 377-553                        | 8              | 120               | Amazónico               |
| 16                 | 262-1267                       | 2              | 880               | Laurásico               |
| 17                 | 293-584                        | 3              | 663               | Amazónico               |
| 18                 | 241-411                        | 6              | 1998              | Amazónico               |
| 19                 | 242-256                        | 2              | 684               | Misceláneo              |
| 20                 | 199-766                        | 1              | 460               | Amazónico               |
| 21                 | 640-1739                       | 5              | 399               | Andino Norte            |
| 22                 | 359-1516                       | 5              | 1012              | Laurásico               |

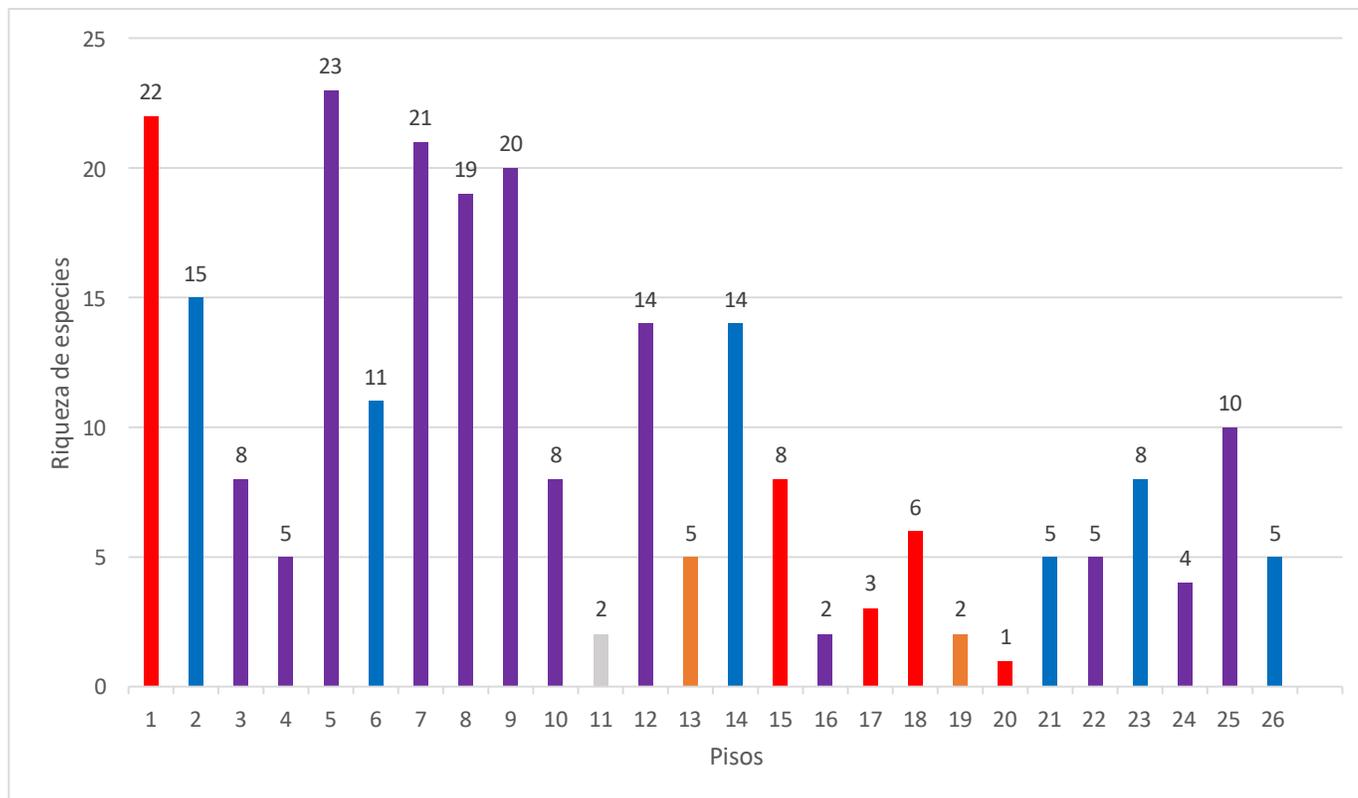
**Cuadro 8.** Continuación riqueza, abundancia y el origen dominante de los 26 pisos del Gradiente ambiental Sierra de las Minas a Costa Suroriente.

|    |           |    |      |              |
|----|-----------|----|------|--------------|
| 23 | 176-1479  | 8  | 1150 | Andino Norte |
| 24 | 176-2481  | 4  | 1176 | Laurásico    |
| 25 | 181-2563  | 10 | 2125 | Laurásico    |
| 26 | 1481-2387 | 5  | 1144 | Andino norte |

**Figura 5.** Porcentaje de frecuencia de familias por origen fitogeográfico presentes dentro de cada piso en el Gradiente de Sierra de las Minas Costa Suroriente de Guatemala.



**Figura 6.** Gráfica de barras de riqueza de especies en los 26 pisos en el Gradiente de Sierra de las Minas Costa Suroriente de Guatemala y el origen fitogeográfico dominante por piso.



## **C. ANÁLISIS DE VARIABLES AMBIENTALES DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS PISOS.**

Con los pisos ya establecidos se generó una serie de mapas con distintas variables ambientales para determinar si los pisos están regidos por algún patrón ambiental del área de distribución. En la Figura 7 observan los 26 pisos y las zonas de vida de Holdridge. Donde se ve una distribución a lo largo de las 14 zonas de vida presentes. Habiendo dominancia en los pisos más bajos por los bosques húmedos y una mayor preferencia en los pisos más altos por bosques secos. Además, se observa la alta heterogeneidad de la zona de estudio, debido a la presencia de bosques secos y húmedos. En la Figura 8 se observa el mapa de humedad, donde se puede identificar que la mayoría de los pisos están regidos mayoritariamente por el valor de MUY HUMEDO (1) y HUMEDO (2), sobre todo en los primeros pisos. Habiendo una mayor dominancia de zonas con valores de MUY SECO (4) y SECO (3) en los últimos pisos.

En la Figura 9 se observa la geología de la zona y los pisos. En este mapa se puede ver cómo en la zona de estudio hay una mayor presencia de rocas ígneas y metamórficas. Sobre todo, se ve una dominancia de rocas Volcánicas Terciarias (Tv) y Volcánicas Holocenos (Qv). También se observan zonas con presencia de rocas Volcánicas Pleistocénicas (Qp). En los primeros pisos, en las zonas más bajas se observa una dominancia de rocas sedimentarias del Eoceno (Tic). Finalmente se generó un mapa con los volcanes presentes en la zona siendo estos 16.

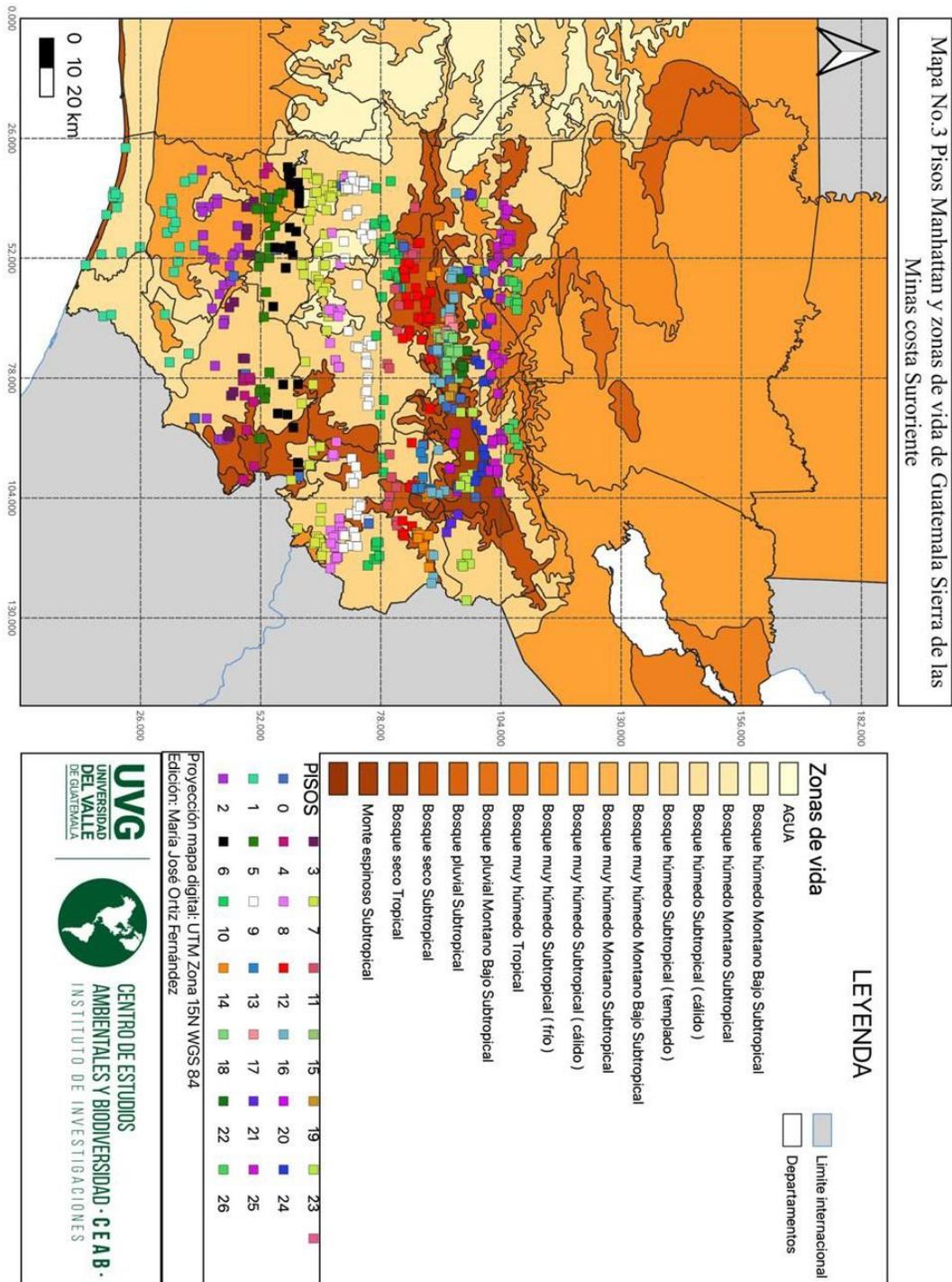
En los primeros pisos es donde se encuentra la mayor cantidad de volcanes: Volcán Pacaya, Tecuamburro, Cruz Quemada, Cerro Redondo, Jumaytepeque, Las Vivoras, Chingo y Volcán Amayo. En los pisos medios se encuentra el volcán Azaltante, Jumay, Tahual, Ipala, Quetzaltepeque y Cerro el Tobón.

Finalmente, en la Figura No. 14 se observa el análisis de caja de bigotes de las variables ambientales: precipitación, humedad, temperatura y elevación. Se realizó un análisis de correlación (Apéndice 1) por lo que se determinó que la geología para este análisis sólo dio un perfil cualitativo, que fue incluido para determinar una relación entre las variables ambientales y la dominancia geológica en los pisos. Así pues en cuanto a la edafología se observó una dominancia de rocas sedimentarias (Qa -aluviones del Cuaternario) en los pisos 21 al 26. Mientras

que en el primer piso (Costa Sur) y el medio ( Centro seco) hay una dominancia por rocas ígneas y metamórficas (Qp y Qv - Cuaternario, Tv y I - Terciario).

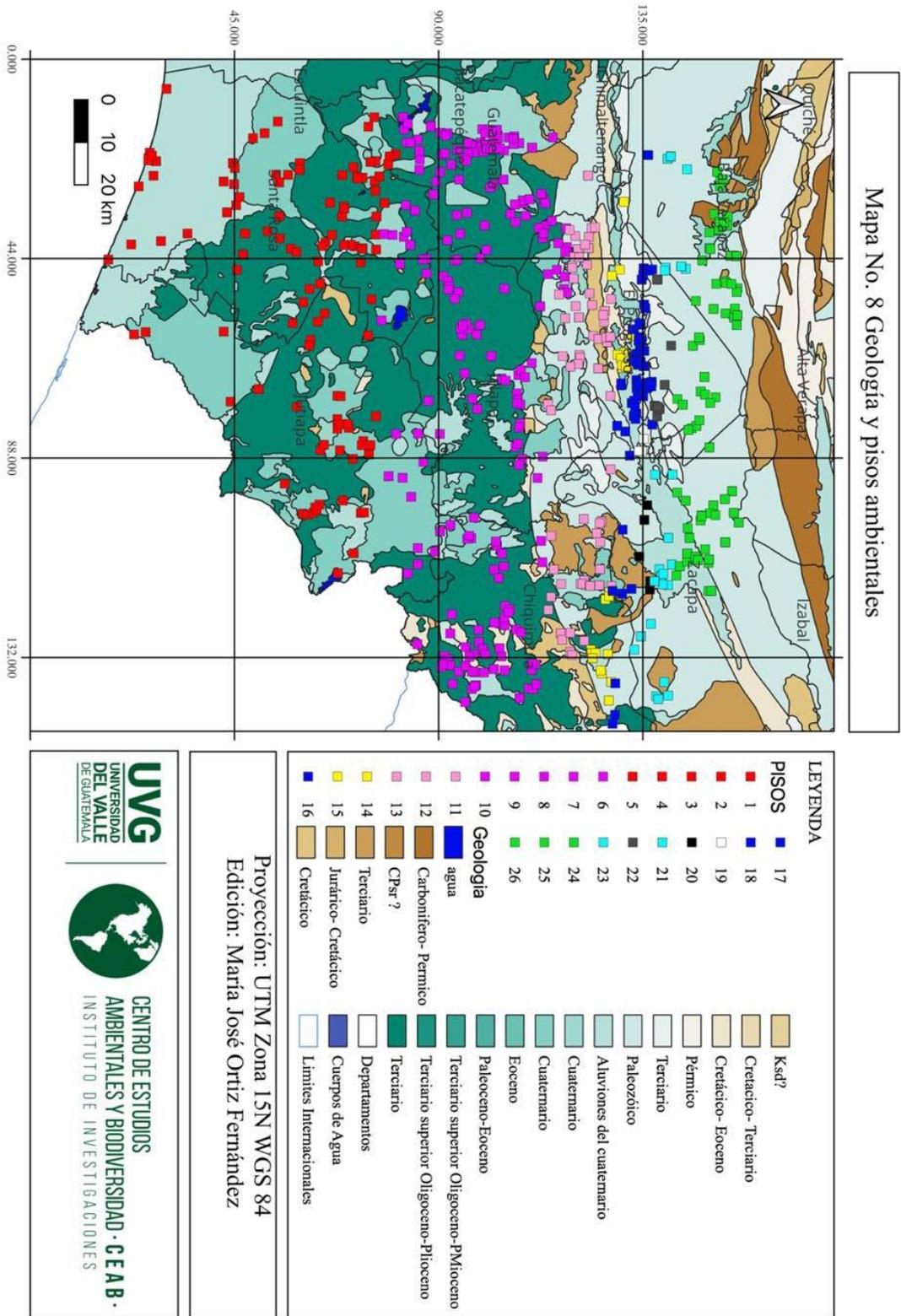
En la misma línea, en cuanto a la precipitación se observa que en el piso de la Costa sur hay una mayor precipitación, al igual que en los últimos pisos de Sierra de las Minas. Siendo como se esperaba bastante baja la precipitación en los pisos del Centro Seco. En cuanto a la humedad el rango va creciendo, por lo que se observa que en los primeros pisos hay valores de humedad promedios, subiendo levemente en los últimos. A diferencia de las variables anteriores la temperatura se mantiene relativamente constante por lo que no hay rangos bruscos en cuanto al cambio de temperatura en el gradiente.

**Figura 7.** Mapa de zonas de vida y los 26 pisos de Sierra de las Minas Costa Suroriente de Guatemala y el origen fitogeográfico.

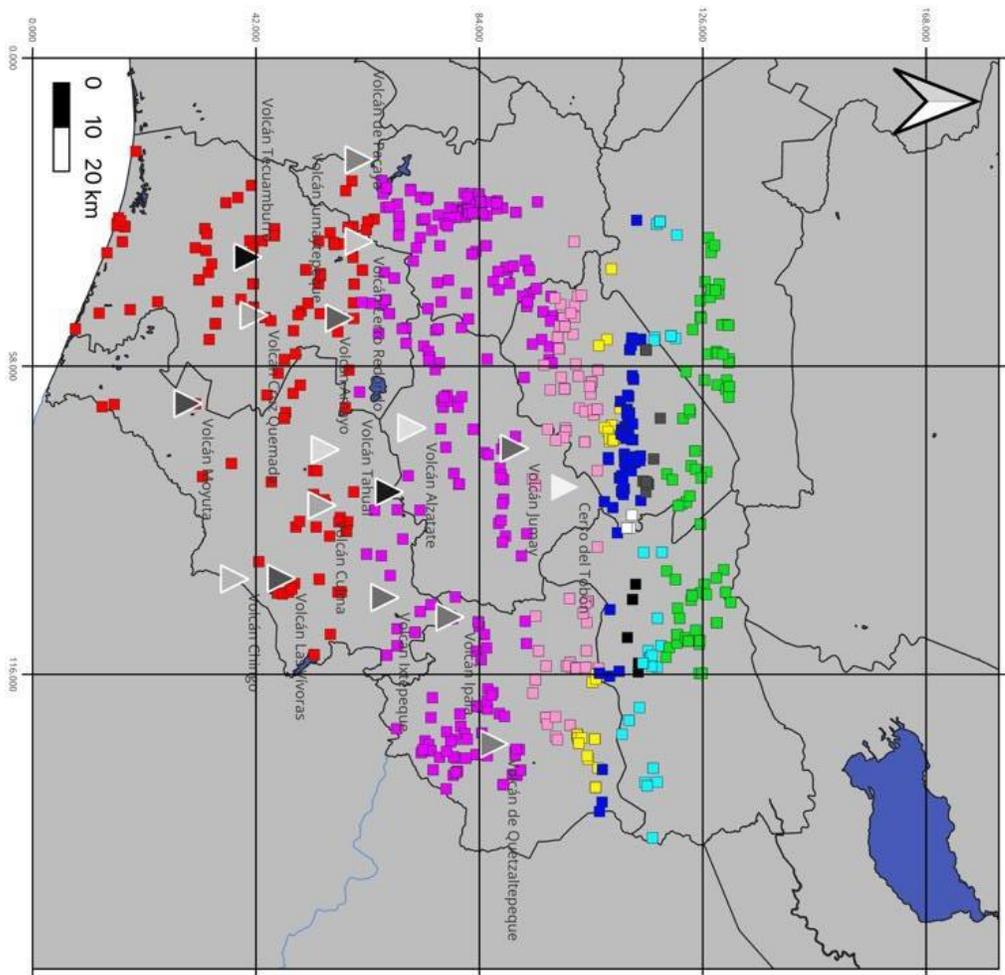




**Figura 9.** Mapa de geología y los 26 pisos de Sierra de las Minas Costa Suroriente de Guatemala y el origen fitogeográfico dominante por piso.



**Figura 10.** Mapa vulcanología y los 26 pisos de Sierra de las Minas Costa Suroriente de Guatemala.



Mapa No. 9 Volcanes presentes en GASMCS y los 26 pisos

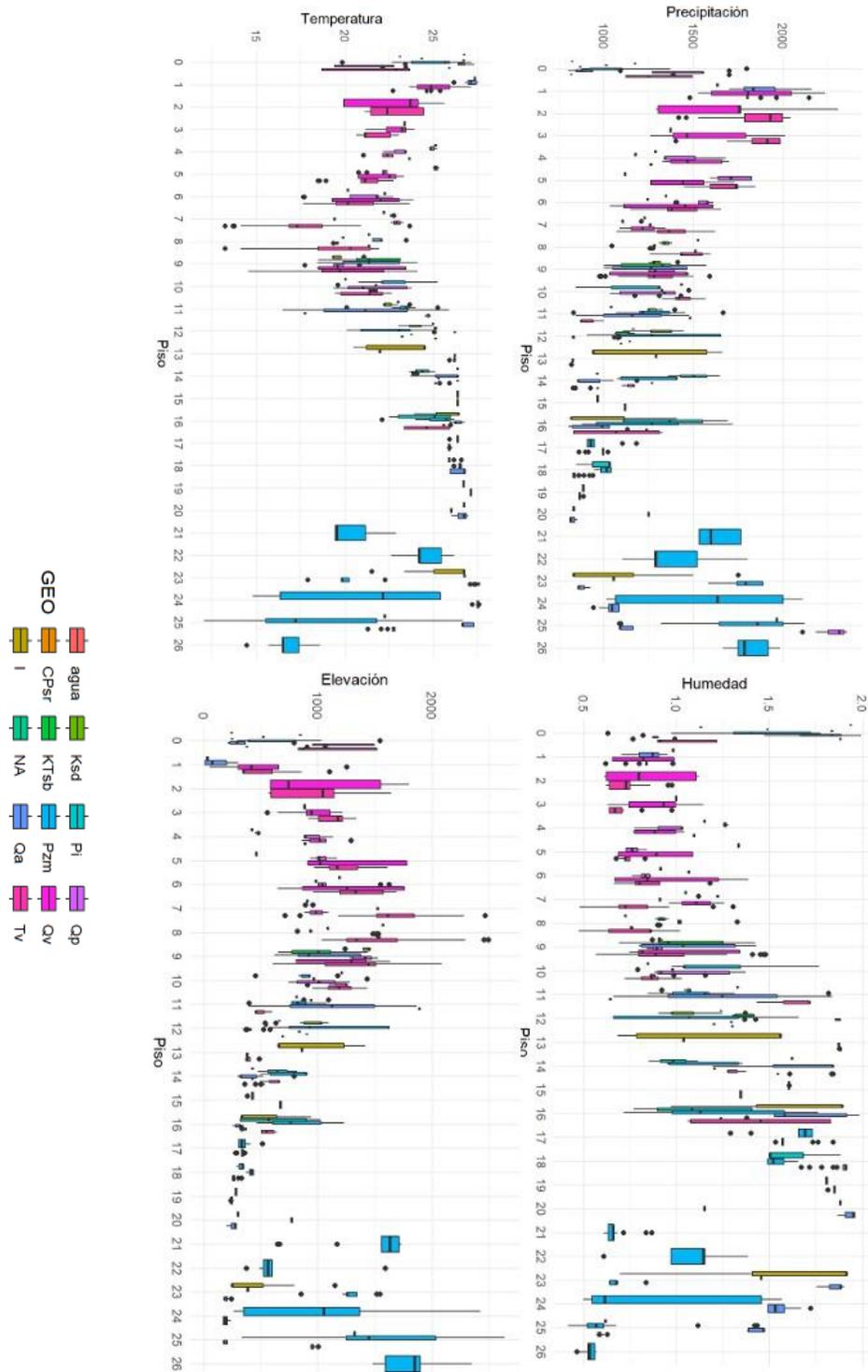
| VOLCANES                   |                           |
|----------------------------|---------------------------|
| ▲ Cerro del Tobón          | ▲ Volcán Ipala            |
| ▲ Volcán Alzatate          | ▲ Volcán Ixtepeque        |
| ▲ Volcán Amayo             | ▲ Volcán Jumay            |
| ▲ Volcán Cerro Quemado     | ▲ Volcán JumayTepeque     |
| ▲ Volcán Cerro Redondo     | ▲ Volcán Lacandón         |
| ▲ Volcán Chingo            | ▲ Volcán Las Vvoras       |
| ▲ Volcán Cruz Quemada      | ▲ Volcán Moyuta           |
| ▲ Volcán Culma             | ▲ Volcán Tahual           |
| ▲ Volcán de Pacaya         | ▲ Volcán Tecuamburro      |
| ▲ Volcán de Quetzaltepeque | ▲ Cuerpos de Agua         |
|                            | ■ Límites Internacionales |

Proyección mapa digital: UTM Zona 15N WGS 84  
Edición: María José Ortiz Fernández

  
**UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA**

  
**CENTRO DE ESTUDIOS AMBIENTALES Y BIODIVERSIDAD - CEAB - INSTITUTO DE INVESTIGACIONES**

**Figura 11.** Análisis de caja de bigotes para las variables de precipitación, humedad, temperatura y elevación de los 26 pisos del gradiente de Sierra de las Minas Costa Suroriente de Guatemala utilizando el índice de similitud de Manhattan.

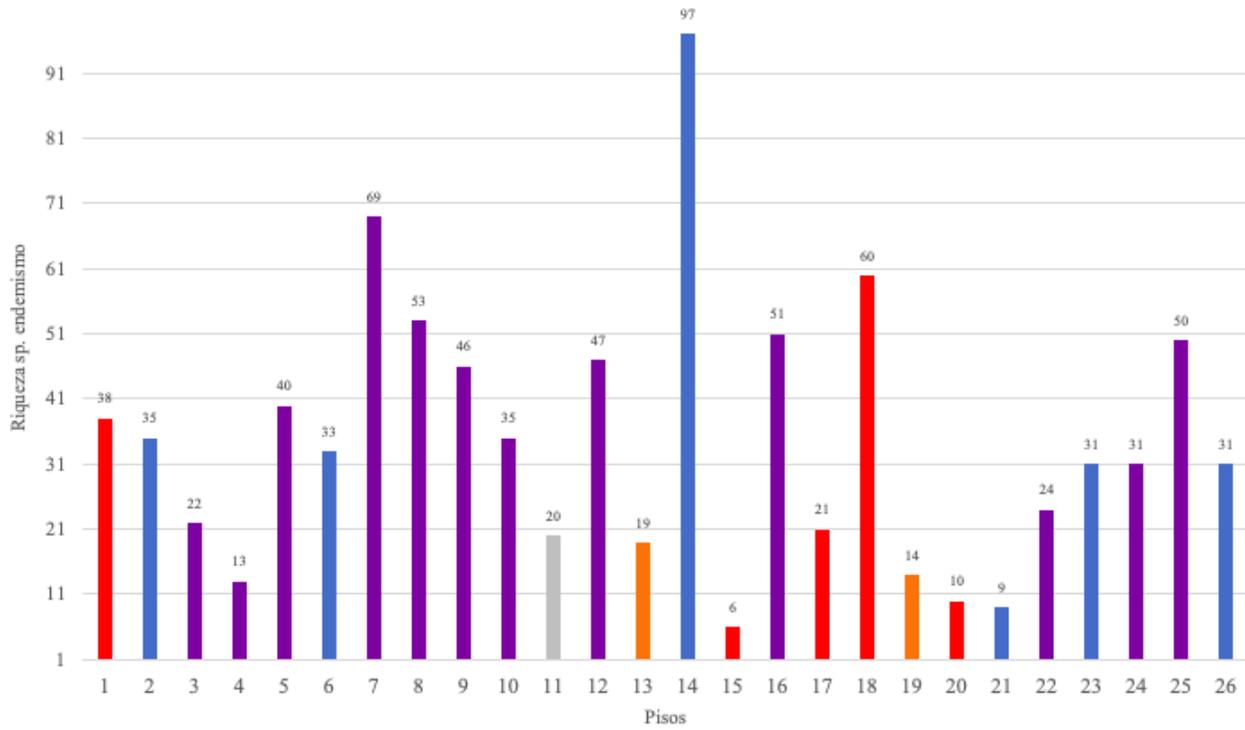


## **D. ANÁLISIS DE ESPECIES ENDÉMICAS EN LOS 26 PISOS**

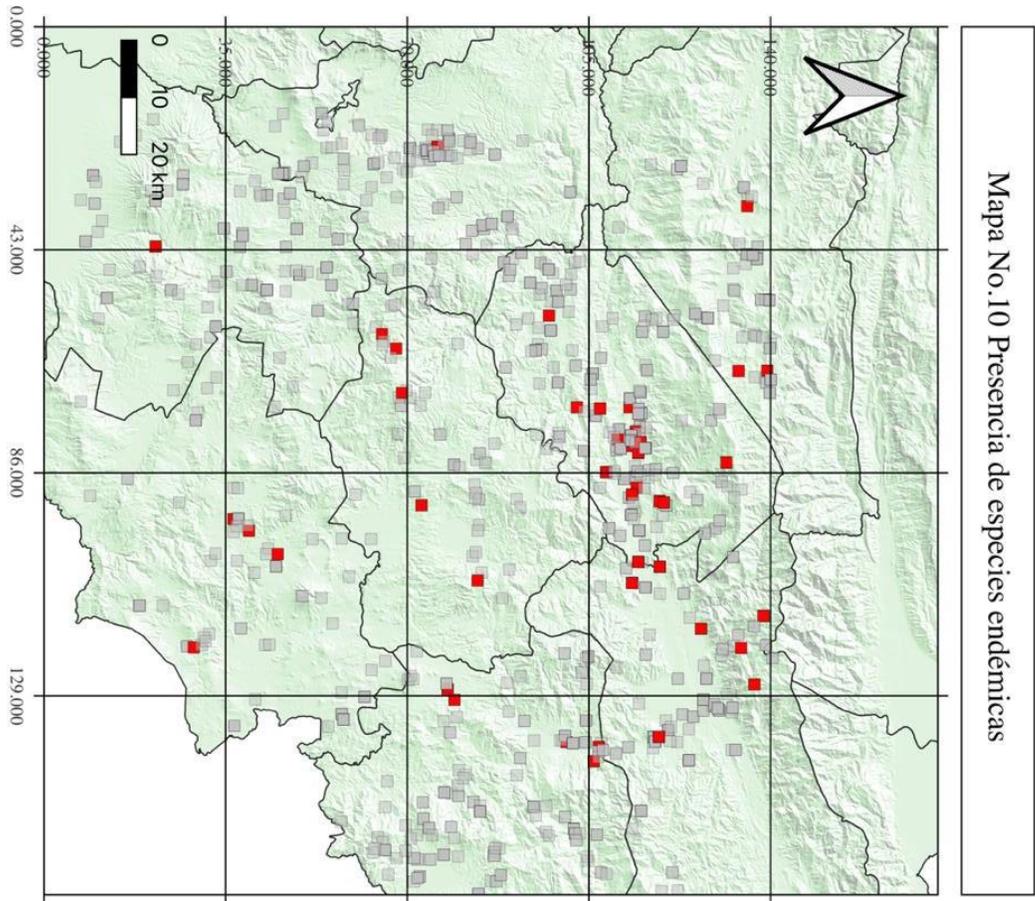
El análisis evidenció la cantidad de especies endémicas que se encuentran únicamente en la zona de registro y en el país. Dentro del listado hubo un total de 508 especies endémicas. En la Figura 12 se evidenció la distribución de la riqueza de especies endémicas por piso. Se observó que el piso con una mayor riqueza de endemismo es el piso 14 perteneciente al Centro Seco que es predominantemente Andino Norte. En cuanto a la costa Sur, el piso con mayor endemismo es el 7 (69 *sp.*), seguido del 8 (53 *sp.*) dominando el origen fitogeográfico Laurásico. Para el grupo de Sierra de Las Minas el piso con mayor endemismo es el 18 (60*sp.*), 16 (51*sp.*) y 25 (50*sp.*) dominando el origen Amazónico y Laurásico.

Geográficamente se puede ver en la Figura 13 las parcelas que contienen especies endémicas, permitiendo ver que, a pesar de la relativa alta riqueza de endemismo en la zona estudiada, las áreas donde se encuentran distribuidas estas especies son restringidas y no abundantes.

**Figura 12.** Gráfica de barras de riqueza de especies endémicas en los 26 pisos en el Gradiente de Sierra de las Minas Costa Suroriente de Guatemala y el origen fitogeográfico dominante por piso.



**Figura 13.** Mapa presencia de especies endémicas en las parcelas de estudio.



Mapa No.10 Presencia de especies endémicas

**LEYENDA**

**PARCELAS**

- Sin especies endémicas
- Presencia de especies endémicas

Proyección mapa digital: UTM Zona 15N WGS 84  
 Edición: María José Ortiz Fernández


**UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA**  

**CENTRO DE ESTUDIOS AMBIENTALES Y BIODIVERSIDAD - CEAB - INSTITUTO DE INVESTIGACIONES**

## VII. DISCUSIÓN

Guatemala se encuentra localizada en la región Centroamericana y limita al Norte con México, al Este con Belice y al Sur con Honduras y El Salvador. El relieve se caracteriza por ser montañoso y con mesetas de caliza, su territorio en general es de 108,889 km con una topografía compleja. El país presenta dos cadenas montañosas que van de Oeste a Este y dividen a Guatemala en tres regiones, además de tener una importante interacción geológica por tres grandes placas: Cocos, Caribe y Norteamérica (Mann, 2007). Dando lugar a las fallas del Polochic, Motagua, Jicotán, Chamelecón y Jalpatagua (Figura 14) (Eckert, 2020).

Gracias a dicha complejidad se da la interacción entre los bloques Maya y Chortís, lo que a su vez hace que el país tenga una alta diversidad biológica (García, 2014). Se determinaron múltiples factores ambientales y climáticos que influyen en la distribución actual de las especies vegetales, por lo que para entender la complejidad y los cambios que suceden en los ecosistemas de un lugar, es importante estudiar su geología histórica, así como todos los eventos que pudieron dar lugar a un ecosistema actual (Plafker, 1978).

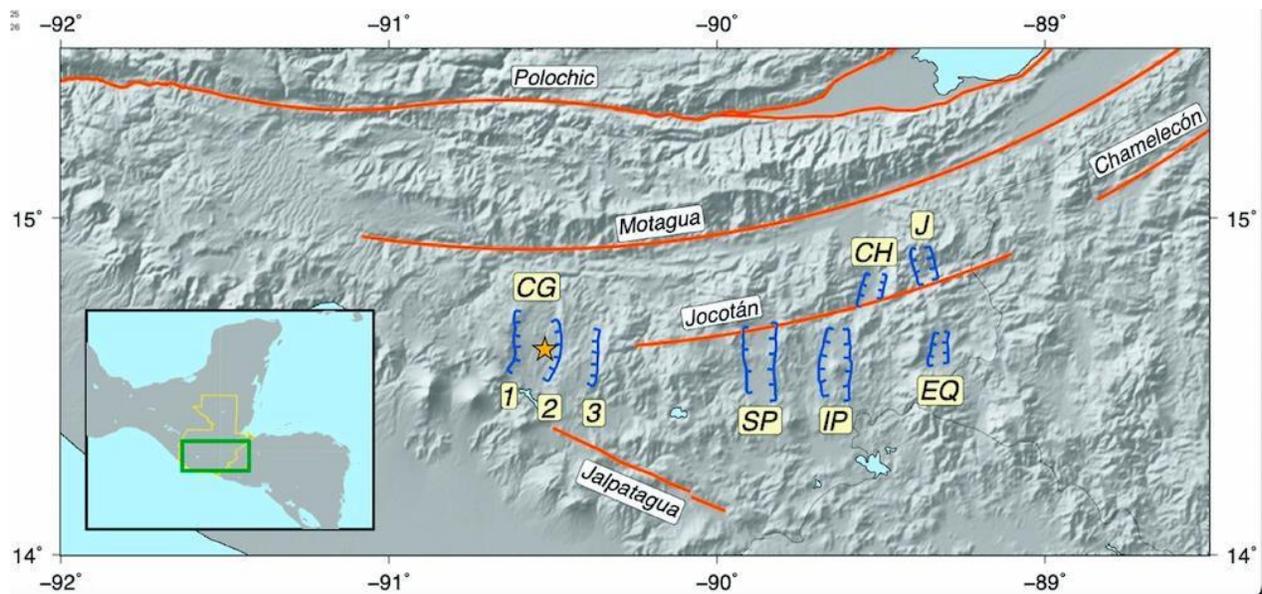
Debido a los distintos factores geográficos se hipotetiza que la composición vegetal en el gradiente altitudinal de Sierra de las Minas costa Suroriente en Guatemala va a ser dominado por especies de origen Laurásico en los pisos más altos, Gondwaniano en los pisos más bajos y se espera una mezcla entre ambos en las zonas medias en la generación de los pisos altitudinales.

El objetivo de este proyecto fue el análisis de los cambios en la composición del origen fitogeográfico de la vegetación en el gradiente altitudinal de Sierra de las Minas Costa Suroriente en Guatemala (GASMCS) con bases de datos de GBIF. Esta zona se escogió debido a que ya se han realizado estudios previos sobre fitogeografía en el gradiente de elevación altitudinal en el Suroccidente Costa Altiplano de Guatemala (López, 2019).

Bajo la misma línea hay otros estudios que evidencian la importancia de entender la historia ocurrida durante el Gran Intercambio Biótico Americano que es un suceso determinante para comprender la ecología actual (Cano y Shuster, 1995). Sin embargo, no existía un análisis de patrones de fitogeografía para la costa Suroriente del país. Cabe recalcar que con la revisión de bases de datos de GBIF no existe este tipo de análisis para toda la región, por lo que la generación

de esta metodología marca una apertura para futuras investigaciones de historia fitogeográfica con registros de bases más completas y extensas que podrían estar revelando un perfil más completo sobre la ecología actual y pasada. Siendo éste un estudio pionero que generó una metodología certera que permite analizar zonas con geología heterogénea como Guatemala, por lo que puede ser implementado para el resto del país y Centroamérica.

**Figura No. 14** Principales fallas de Guatemala.



Comprender cómo se han establecido los patrones de distribución actuales en la flora y fauna neotropical requiere conocer los procesos históricos que han influido en la variación de las tasas de especiación y extinción de diferentes grupos (Eckert, 2020). Por lo que uno de los objetivos específicos fue generar una explicación de la posible relación entre el origen fitogeográfico de la vegetación presente y la distribución espacial a partir de las variables estudiadas (Altura, precipitación, temperatura, geología y humedad).

Estas variables fueron estudiadas debido a que se ha evidenciado que dado a los procesos geológicos y climáticos que acaecieron en Sudamérica durante el Cenozoico, como el

levantamiento y formación de la cordillera de los Andes, la configuración de la floresta amazónica, el establecimiento de la conexión terrestre con Norteamérica y su impacto en las corrientes oceánicas y atmosféricas y por ende en el clima, proporcionaron eventos evolutivos claves para entender el establecimiento de la identidad faunística del Neotrópico. En este contexto, el Gran intercambio Biótico Americano es uno de los eventos biogeográficos de mayor importancia, no sólo por su influencia en el desarrollo de la fauna sudamericana sino también a escala global (Bacon y Jaramillo *et al.*, 2016).

Así mismo este suceso y la influencia de las glaciaciones en la distribución de los ecosistemas con variaciones altitudinales, en un ambiente de elevada heterogeneidad topográfica, darían lugar a múltiples procesos de fragmentación de las áreas de distribución y especiación por lo que podemos ver la gran importancia que presenta la variabilidad topográfica para comprender los patrones de distribución de riqueza de especies a escala continental (Rahbek y Graves, 2001).Dicho suceso fue evidenciado en la generación de 26 pisos ambientales con una alta variabilidad altitudinal (Apéndice 1).

## **A. PISOS AMBIENTALES Y PATRONES ENCONTRADOS**

Los pisos ambientales generados son definidos por relaciones que existen entre las especies vegetales presentes en las parcelas (Figura 3), donde se observaron que según la presencia y ausencia de las especies presentes hay un total de 26 pisos con un total de 607 parcelas. Los pisos fueron propuestos bajo una serie de análisis sistemáticos a la base de datos en la línea de estudio utilizada por Shuster *et al.*, (2000). En grupos más externos de la cladograma se forman tres grandes grupos llamados los pisos de la Costa Sur que va desde el piso I al XIII, luego el piso del Centro Seco que va desde el piso XIV al XV y el último es el de Sierra de Las Minas que abarca desde el XV1 al XXV1 (Figuras 4 y 15).

Con los resultados encontrados se evidenció que la complejidad y distribución de las especies de origen Gondwaniano y Laurásico no dependen de una sola variable (altitud) como se hipotetizó. A diferencia de los estudios fitogeográficos altitudinales en Guatemala, como el de López (2019), los pisos que se generaron no fueron nombrados como “altitudinales” ya que debido

a la complejidad de los datos y el análisis realizado se identificó que estos pisos siguen un patrón más complejo que no está determinado por una sola variable. Además, como se observa en la Figura 4 la topografía de la zona de estudio no es un gradiente altitudinal constante. Por tanto, en este estudio fueron llamados pisos ambientales que se ven influenciados por las variables evaluadas (altitud, temperatura, humedad, precipitación y edafología).



Para los pisos de la Costa Sur se observa una dominancia clara de especies de origen Laurásico, seguido de la presencia de Andino Norte y Amazónico. El rango altitudinal de este grupo va desde los 0 msnm hasta 2400 msnm, por lo que el rango es bastante amplio. La dominancia de plantas de este origen es un hallazgo nuevo al hablar de un gradiente altitudinal ya que, según lo encontrado por López (2019) en su estudio los pisos altitudinales que van de 0 msnm hasta 1300 msnm están dominados por plantas de origen Gondwaniano para el Sur Occidente Costa Altiplano de Guatemala. Aunado a lo anterior, una gran cantidad de plantas Gondwanianas son árboles de tierras bajas, mientras que las Laurásicas dominan el dosel de bosques montanos (Gentry, 1982).

En la Figura 7 se observó cómo la concentración de áreas de bosque pluvial montano se encuentra en las zonas más cercanas al Norte y Sierra de las Minas, mientras que en la zona de la Costa Sur hay bosque húmedo Montano subtropical (cálido) y bosque muy húmedo subtropical. Por lo que las zonas de vida, sí pueden ser un factor que influye en la distribución de dichas familias más no el único factor determinante. Por ejemplo, se sabe que para las especies de origen Laurásico hubo múltiples sucesos geológicos que explican su dominancia en esta zona, como la explosión de los chocoyos (Lohse *et al.*, 2018) que afectaron drásticamente la biota del lugar. Siendo una característica importante para las plantas de este origen la alta adaptabilidad a zonas con condiciones ambientales drásticas y con amplia variabilidad (Janzen, 1967). Por lo que estas adaptaciones permitieron que las especies Laurásicas se pudieran dispersar con mayor facilidad, por ende también durante la formación y desaparición de glaciares lograron cruzar y dominar montañas y valles (Islebe *et al.*, 1995).

De igual manera hay otros factores del ecosistema que influyen en la distribución de estas especies, tales como la humedad, precipitación y temperatura. La humedad de la costa es mayoritariamente húmeda a algunas zonas secas (Figura 8). Las zonas húmedas se centran en el área de Santa Rosa, Ciudad de Guatemala, Chiquimula, Jutiapa y Jalapa. Habiendo zonas secas y muy secas en Jutiapa, El Progreso, Jalapa y Chiquimula. La humedad es un factor importante en la formación de las comunidades vegetales presentes ya que el contenido de agua del suelo es otra importante variable para predecir la descomposición de la materia orgánica y la formación de gases invernadero asociada a ella, como consecuencia de una modificación del clima (Reichstein *et al.*,

2002; Tang y Baldocchi, 2005). Por otro lado, la sequía en el suelo limita la actividad fisiológica de los microorganismos y la difusión de nutrientes en el espacio poroso del suelo (Harris, 1981).

De forma general puede indicarse que la actividad metabólica disminuye en el suelo cuando éste se seca por debajo de un determinado límite y que, cuando hay un exceso de agua la actividad metabólica también desciende, debido a la sustitución de unas poblaciones aeróbicas por anaerobios obligados y a la limitación de la difusión del oxígeno (Rodrigo *et al.*, 1997). A diferencia de la humedad, la precipitación de este grupo se mantiene por debajo de los 2000 mm, siendo la mayor precipitación en los pisos 1, 3 y 5, luego éste disminuye drásticamente a medida que las parcelas se van acercando a las zonas más secas. Las condiciones cambiantes a lo largo del gradiente hacen que las plantas deban adaptarse al entorno.

Algunas de las adaptaciones se dan a niveles de estructura y fisiología en las plantas, tales como las rutas metabólicas C3, C4 y CAM que se encuentran en las plantas vasculares. Este mecanismo de adaptación se evidenció que ha evolucionado de una sola ruta metabólica en común, gracias a las distintas condiciones en las que las plantas se encontraban desde las plantas C3 hasta llegar a ser C4 y CAM. El proceso metabólico C3 se da gracias a la capacidad de la enzima ribulosa-1,5 bisfosfato carboxilasa (RUBISCO) para catalizar la oxigenación simultáneamente con la carboxilación, promoviendo el funcionamiento del ciclo fotorrespiratorio (Wolosiuk *et al.*, 2010). Por tal razón las plantas con este metabolismo están mejor adaptadas a ambientes frescos y húmedos permitiéndoles tener una distribución más amplia, como las encontradas en las zonas de la Costa Sur (Sage y McKown, 2006).

Por otro lado, los mecanismos posteriores (C4 y CAM) son una adaptación a ambientes desérticos (CAM) y ambientes tropicales cálidos (C4) por lo que su distribución ecológica y biogeográfica es más restringida. El mecanismo C4 se cree que se dio como una ventaja adaptativa por ancestros C3 para tolerar condiciones extremas del ambiente devino (Hibberd y Quick, 2002), por lo que históricamente hace 2,700 millones de años la fotosíntesis es responsable de la vida sobre la tierra. El metabolismo C3 prevaleció en la mayoría de los ecosistemas terrestres hasta la expansión de las plantas C4 hace 5-8 millones de años en el mioceno tardío (Osborne y Beerling, 2006). Actualmente la fotosíntesis C4 predomina en tres familias de monocotiledóneas y 16 familias de dicotiledóneas (Sage y McKown, 2006). Las principales familias de monocotiledóneas

encontradas en la Costa Sur son las principales representantes del mecanismo C4, siendo éstas Poaceae y Cyperaceae. Las variaciones en las características metabólicas pueden atribuirse a distintos orígenes independientes provenientes de 19 familias superiores, siendo un ejemplo importante de evolución convergente en las plantas. En general, las plantas C4 y CAM poseen una distribución más restringida que las C3, predominando en las zonas áridas y salinas del planeta (Sage y McKown, 2006). Se ha hipotetizado que el metabolismo C4 constituye una forma de aclimatación de las especies C3 expuestas a perturbaciones ambientales durante plazos largos (Niu *et al.*, 2006), sucesos que se han dado a lo largo de la historia de la formación de la Tierra.

El segundo grande grupo es el Centro Seco, este grupo es el más limitado ya que únicamente va del piso 14 al 15 y en altura va desde los 260msnm hasta los 1200 msnm por lo que posee también el rango de altitud más pequeño en comparación a Sierra de las Minas y la Costa Sur. Los bosques secos se encuentran generalmente por debajo de los 2,000 msnm y en comparación con los bosques lluviosos tropicales se caracterizan por tener altitudes y áreas basales menores (Ariano *et al.*, 2009). La humedad es mayoritariamente seca y muy seca, aunque hay zonas húmedas (Figura 8). Este factor aunado con la precipitación hace que su existencia se deba principalmente a la estacionalidad en lluvias, altura sobre el nivel del mar, riqueza de suelo y sombras de lluvia que producen las montañas relacionadas (Murphy y Lugo, 1986; Pennington *et al.*, 2006).

A diferencia de la Costa Sur este piso está dominado por especies de origen Gondwaniano con centro Amazónico (38%) y Andino Norte (32%). Estos resultados coinciden con lo encontrado por López (2019), ya que se encontraron las especies de origen Andino a elevaciones medias. Las familias de origen Amazónico predominan principalmente en tierras bajas neotropicales y constituye casi todo el dosel de los bosques húmedos de las tierras bajas centroamericanas, por lo que tienden a tener una amplia distribución (Gentry, 1982). Con respecto a las especies con centro Andino Norte, este grupo representa la mayor parte de la alta diversidad florística de la región del Chocó y muestran un endemismo muy pronunciado en Centroamérica, con el 73% de las especies centroamericanas endémicas (Ariano *et al.*, 2009). La presencia de estas familias también coincide con las zonas de vida del lugar ya que está presente el bosque muy húmedo bajo subtropical (Cálido) y el Bosque Húmedo Montano subtropical, zonas características de estas familias (Gentry, 1982).

A pesar de que las especies dominantes son una característica principal de las zonas previamente mencionadas, el grupo también se caracteriza por zonas de vida como los bosques secos subtropicales y el bosque seco tropical. Los bosques secos en esta zona son dominantes en todos los departamentos incluidos en el estudio, siendo el área de El Progreso, Zacapa y Jutiapa los departamentos con las extensiones más grandes de este ecosistema (CONAP, 2011). Los taxones de las zonas secas son prueba de una larga historia evolutiva que implica la persistencia ininterrumpida de estas zonas durante parte del Cenozoico (Pennington *et al.*, 2016).

Axelrod (1979) plantea que gran parte de la evolución y diferenciación temprana de estos taxones pudo haberse producido en zonas edáficamente secas con taxones que se extendieron a medida que los climas secos se expandieron a finales del Terciario y el Cuaternario. Gentry (1982) plantea que a pesar de que muchos de estos taxones de las zonas áridas parezcan ser autóctonos de México y del Norte de Centroamérica, la mayoría de las especies tienen claramente una afinidad Gondwaniana. Siendo resultado de una activa diversificación evolutiva en respuesta a los regímenes climáticos cada vez más secos del Plioceno y Pleistoceno, y no necesariamente de un origen autóctono (Gentry, 1982; Carlaquist, 1982).

La orografía de estas regiones está conformada por valles secos intermontanos o planicies de inundación. Los movimientos tectónicos de las placas Norte América y Caribe son principalmente responsables de esta peculiar orografía. Al sur de Guatemala se encuentra ubicada la placa de Cocos, que subduce bajo la placa Caribe, la cual a su vez limita en su parte superior con la placa Norte América (Denver, 2008). Se observa un empuje hacia el continente por parte de las placas y la topografía que se tiene en el área ha sido provocada por el choque entre las placas Caribe y Norte América (Ligorria, 2004). Esto explica la existencia de efectos de sombra de lluvia, lo que ha creado las condiciones ambientales que permiten el apareamiento de la vegetación típica de regiones secas (CONAP, 2011). Tal situación hace que la amenaza de sequías en dichas regiones sea muy alta debido a las condiciones de baja precipitación y evapotranspiración.

En esta área de Centro Seco se puede observar que a pesar de que las zonas secas dominan las áreas subtropicales tienden a tener una mayor abundancia de especies, lo que explica por qué en las zonas mayoritariamente secas las especies sean dominadas por familias que se encuentran en las zonas húmedas del piso. Además, evidencia cómo las especies de las zonas secas son más

escasas debido a las adaptaciones tan específicas que tienen para sobrevivir a las condiciones extremas del lugar. Por ejemplo, algunas adaptaciones son la tolerancia a estrés hídrico severo (plantas CAM) a partir de la succulencia de tejidos o succulencia celular, disminución drástica en relación área/volumen de los órganos fotosintéticos, cierre estomático diurno que limita fuertemente la pérdida de agua y apertura estomática nocturna con lo cual no se compromete la ganancia de CO<sub>2</sub>, etc. (Black y Price, 1994). La especificidad en las adaptaciones de las especies de áreas secas hace que tengan una vulnerabilidad alta con pérdida de su cobertura histórica de hasta el 75% en Guatemala (CONAP, 2011).

Finalmente, en el grupo de Sierra de las Minas se englobaron los pisos 16 al 26 con un rango altitudinal que va desde los 240 msnm hasta los 2500 msnm. A diferencia de los primeros dos grupos éste, está dominado por plantas de origen Laurásico. Los resultados obtenidos son coherentes con lo discutido por Gentry (1982), Avendaño, (2012) y López, (2019) ya que, en los pisos más altos, acercándose al norte se encontraron familias de dicho origen fitogeográfico. Sin embargo, es importante mencionar que los pisos generados en estos estudios previos están regidos plenamente por la altura, aspecto que en este gradiente no coincide, debido a la alta heterogeneidad de la zona y que éste no es un piso altitudinal constante. Por otra parte, en Sierra de las Minas, la Costa Sur y el Centro Seco las especies de Centro Andino Norte se mantienen presentes, coincidiendo con lo encontrado por López (2019) en la Costa Suroccidente del Altiplano guatemalteco.

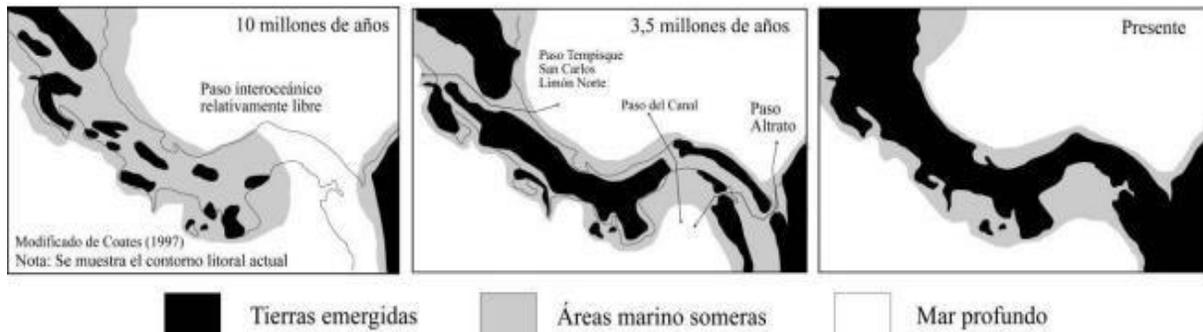
Las zonas de vida presentes en este piso son mayoritariamente bosque seco tropical, bosque pluvial tropical, bosque muy húmedo tropical y subtropical (frío). En relación con la humedad hay zonas que van desde muy húmedas hasta muy secas (Figuras 8 y 11). Por lo que el rango de humedad de este grupo es bastante amplio debido a los distintos ecosistemas que hay. La precipitación también tiene un rango amplio, habiendo zonas donde no llueve y pisos como el 24 donde la precipitación va desde los 1000 a los 2000 mm. Esto es una característica clave de la zona, ya que la orientación de la montaña con relación a los vientos del Caribe, determinan fuertemente el clima y las condiciones ecológicas de las regiones adyacentes. Haciendo de igual manera que la precipitación y temperatura varíe considerablemente en distancias muy cortas (CONAP, 1999). En este grupo, a diferencia de donde la temperatura se mantiene relativamente constante, la temperatura tiene rangos amplios en los pisos 24 y 25 (Figura 11). Ambos pisos tienen

las parcelas con una distribución amplia geográficamente dado que se dispersan sobre las distintas 4 zonas de vida mencionadas (Figura 7).

En el piso de Sierra de las Minas se observó que la riqueza de especies es la más baja a comparación del piso de la Costa sur que tiene una mayor riqueza (Figura 6). No obstante, esto puede deberse a que la agrupación generada por el análisis de Manhattan engloba un mayor número de parcelas en el grupo de la Costa Sur a comparación del resto. Por tal razón las especies que van desde las costas a nivel del mar a zonas medias y altas el rango de altitud es el más amplio, por ende, las variables ambientales involucradas igual, lo que conlleva a que haya una mayor riqueza en la zona. En Sierra de las Minas la diferencia en elevaciones y las condiciones climáticas del área la hacen funcionar como islas de evolución genética, con alta incidencia de individuos endémicos (Lehnhoff, A. y Núñez, 1998).

## **B. GEOLOGÍA Y EDAFOLOGÍA**

La geología de la zona también fue evaluada como un factor que pudiese explicar la distribución de los pisos generados y los factores abióticos que pudieron influir en la formación de los pisos. A pesar de lo anterior y a diferencia del resto de factores evaluados (temperatura, precipitación, elevación, humedad), éste no presentó un valor significativo en el análisis de correlación por tanto la relación no puede ser estadísticamente comprobada (Apéndice 1). Consecuentemente se realizó un análisis netamente descriptivo para determinar si hay un patrón en la distribución de los pisos con respecto a la geología y edafología de la zona. La geología de Guatemala es bastante compleja (Figura 9), siendo uno de los sucesos más importantes el cierre del Istmo Centroamericano. Durante el Plioceno la fuerte actividad volcánica y en conjunto con la colmatación de las cuencas sedimentarias y la tectónica provocan el cierre definitivo del puente de América Central (Figura18) (McCraken, 1989). El tránsito o migración entre Norte y Sur América, fue parcialmente controlado por las diferencias topográficas y climáticas que generaron un filtro biogeográfico (Denyer, 2008).



**Figura No. 16** Cierre del istmo centroamericano (Coates, 1997).

La zona estudiada está conformada principalmente por rocas volcánicas (Cenozoico) en la Costa Sur y el Centro Seco. Así mismo en las zonas más bajas se encuentran rocas sedimentarias (Neógeno) y en Sierra de las Minas son Rocas Metamórficas (Paleozoico) con zonas muy específicas que poseen complejos de ígneos básicos y ultra básicos (Figura 16) (Bundschuh y Alvarado, 2007). Dicho patrón se repite por piso ya que las rocas dominantes presentes son mayoritariamente ígneas y Metamórficas Tv (Terciario), Qp y Qv (Cuaternario) en los pisos de la zona de la Costa Sur, para el Centro Seco son Pi (Terciario) y el área de Sierra de las Minas son Pzm (Paleozoico) (Figura 11). Sin embargo, se puede ver que las rocas que abundan en la Costa Sur son mayoritariamente en los primeros pisos, disminuyendo drásticamente su presencia en el resto, a medida que se acerca al norte. También una característica importante es que en la zona de la Costa Sur es donde está el 100% de la concentración de volcanes con un total de 13 (Figura 10).

La dominancia de rocas metamórficas en la Costa Sur coincide con la conformación de los bloques Maya y Chortís que justo atraviesan la zona que representan el basamento del norte de América Central. Tienen una edad del Mesoproterozoico al Paleozoico. Están formadas por esquistos, filitas, metacuarcitas, gneises, migmatitas, anfíbolitas y mármoles (Denyer, 2014). Por tal razón la alta riqueza de especies del área se relaciona con la alta diversidad de los tipos de suelo y rocas (Figura 17) como fue discutido por Rahbek (2019), donde se observó que, a mayor riqueza de tipos de rocas, la riqueza de especies aumentó. Por ende, a pesar de que es únicamente un perfil netamente descriptivo, puede explicar mucho sobre la fitogeografía y distribución de las plantas en Guatemala, en la Costa Sur la abundancia de especies Laurásicas fue mayor.

Lo anterior puede ser explicado por la conexión con áreas más variables, así como el tiempo de conexión extendida con Norteamérica ya que fue más largo que con Suramérica, esto permitió que la dispersión fuese más fácil, caso contrario para las especies de origen Gondwaniano que su distribución es más limitada (Islebe y Hooghiesmtra, 1995). Por otra parte, la evolución de los suelos está determinada por la acción de procesos y factores formadores, tales como naturaleza del material parental, clima, relieve, organismos vivos y el tiempo durante el cual actuaron (MAGA, 2010).

Adicionalmente la geología del país está ligada altamente con la actividad volcánica a lo largo del tiempo, en conjunto con las fuerzas endógenas y exógenas de la tierra que producen tensiones locales, las cuales originan fallas geológicas, formando valles tectónicos y levantamientos (Ligorria, 2004). Siendo un claro ejemplo el volcán de Los Chocoyos, el cual colapsó hace 85,000 años alterando nuevamente la geología y edafología de la zona (Pérez, 2009). Se observa un empuje hacia el continente por parte de las placas y la topografía que se tiene en el área y que ha sido provocada por el choque que existe entre las placas Caribe y Norte América. Tal dinámica ha causado también la formación de una cadena de volcanes de continua actividad, creando la dinámica que ha generado las condiciones ambientales que permiten el apareamiento de la vegetación típica de regiones secas (Cano, 2004).

Estos acontecimientos son puntos de partida para la generación de zonas nuevas de especiación influidos por la dinámica geológica y climática a lo largo del tiempo. Las montañas son regiones litológicas y topográficamente heterogéneas. Las radiaciones evolutivas de las especies se asocian a menudo con fases de levantamiento activo, lo que sugiere que los procesos orogénicos desempeñan un papel en la diversificación, sobre todo a través de la formación recurrente, la conectividad y la aparición de hábitats dentro de las cadenas montañosas. Estos procesos a su vez modifican la composición del suelo y los niveles de nutrientes, impulsando la adaptación de las plantas y su biota asociada a nuevos tipos de hábitat (Rahbek, 2019).

## Mapa de clasificación taxonómica de los suelos de la República de Guatemala



Perfil Ambiental de Guatemala 2022

Fuente: Elaboración propia con base en mapas topográficos del Instituto Geográfico Nacional a escala 1:50,000 y 250,000 y Unidad de Planificación Geográfica y Gestión de Riesgo (Upgr-MAGA), 2005.

Universidad Rafael Landívar -URL-  
 Vicerrectoría de Investigación y Proyección  
 Instituto de Investigación en Ciencia Naturales y Tecnología (Iana)  
 Departamento de Ciencias Ambientales  
 Unidad de Datos e Información Estratégica (UIE)  
 Fecha de elaboración: julio de 2020

 **Universidad Rafael Landívar**  
 Identidad Jesuita en Guatemala

**VRIP**  
 VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN  
 UNIVERSIDAD RAFAEL LANDIVAR

**Figura No. 17** Mapa de clasificación de los suelos de Guatemala (SIE, 2019).

### C. RIQUEZA DE ESPECIES ENDÉMICAS

Las especies endémicas tuvieron una distribución más restringida debido a que no estaban presentes en todas las parcelas. En contraste con el análisis general, éstas se encuentran mayoritariamente en el Centro Seco y Sierra de las Minas (Figura 13). De hecho, el piso con mayor riqueza es el piso 14 con 97 *sp.* perteneciente al Centro Seco, siendo dominado por especies de origen Gondwaniano con centro Andino Norte. Este patrón responde al rango altitudinal que es el menos amplio y se encuentra en tierras bajas, coherente con lo planteado por Gentry (1987), López (2019) y Avendaño (2012), siendo la mayoría de las plantas Gondwanianas de tierras bajas donde dominan áreas de bosques montanos.

El resto de los pisos estuvo dominado por especies de origen Laurásico, esto responde a la alta adaptabilidad del grupo frente a condiciones ambientales más drásticas y variables en comparación con los trópicos (Janzen, 1967). Las adaptaciones más eficientes permitieron que la dispersión de las especies fuera más rápida y fácil, pues lograron atravesar barreras de montañas y dominar los valles (Islebe y Hooghiemstra, 1995).

En la Sierra de las Minas se ve que al comparar la riqueza de especies endémicas con el resto de las zonas fue el que menos riqueza tuvo, lo que puede ser explicado por la limitante de cobertura del área de estudio, ya que la cadena montañosa se encuentra también en los departamentos de Alta Verapaz e Izabal que no fueron incluidos. Además, el punto más alto cubierto fue hasta los 2500 msnm, mientras el punto más alto de Sierra de las Minas es de 3500 msnm. Estos resultados evidencian la necesidad de cubrir el resto de la zona pues se conoce que la presencia de bosques nubosos presentes en el área de Sierra de las Minas son centros de endemismo y *hot spots* de biodiversidad (Eisemann, 2000).

El área tiene aislamientos geográficos con alta variedad de elevaciones que forman una gran diversidad de hábitats para la flora y fauna que, por ser equivalentes a islas de evolución genética, son sitios de alto endemismo (Succhini, 2000). A pesar de la distribución restringida muchas de las familias neotropicales son ecológicamente importantes, por ejemplo, Bromeliaceae y Cactaceae es una de las principales familias que dominaron en la zona del Centro Seco. A pesar de los

resultados obtenidos, éste sólo es un conteo de la distribución de las especies endémicas presentes en el estudio, por lo que se recomienda hacer más análisis estadísticos únicamente con el listado de especies endémicas del estudio, para tener un perfil más completo del comportamiento de los datos, dado que la base de datos de especies endémicas no fue analizado a profundidad como el resto de los datos.

#### **D. APLICACIONES**

El análisis realizado en este estudio tiene un amplio campo de aplicaciones, siendo una de las principales la generación de la metodología para bases de datos de GBIF. El estudio es pionero en análisis fitogeográfico con bases de datos. La metodología está adaptada para poder generar un análisis en gradientes con alta heterogeneidad geográfica como lo es Guatemala y el resto de Centroamérica. Se generaron códigos que permiten un manejo de las bases de datos para la depuración y transformación para que puedan ser analizados de una forma rápida, efectiva y fácil. Por lo que el presente estudio se une a los esfuerzos de investigación fitogeográfica realizados por otros autores, tales como Avendaño (2012) en el área de las Verapaces en Guatemala y López (2019) en el gradiente altitudinal del Sur Occidente de la Costa Altiplano de Guatemala.

Esta metodología permite una nueva forma de análisis, brindando una nueva herramienta que permita dar perfiles más completos, con información y registros de años. Así mismo en este estudio se implementó el análisis de otras variables ambientales, tales como: temperatura, humedad, precipitación, altura y edafología. Al evaluar más variables ambientales se puede tener una mejor comprensión de cómo los bosques pueden modificarse en el futuro, siendo importante en un escenario de cambio climático acelerado. Todas estas variables predicen el comportamiento y las migraciones de la vegetación, Bazzaz (1990) concluye que los impactos sobre la productividad de los ecosistemas podrían generarse a partir de cambios en la composición de las especies producidas por la diferente respuesta de éstas al calentamiento global.

La densidad de las plantas, la composición de las especies, la asimilación de los diferentes recursos y la influencia de herbívoros, patógenos y simbioses de la naturaleza de la tierra podrían interactuar con un medio global cambiante a través de vías complejas que determinarán la

respuesta de la comunidad a las futuras condiciones globales. Finalmente, otra contribución del estudio es que, al comprender la paleoecología y distribución pasada y presente, se pueda predecir con mayor exactitud la futura y permitir la realización de nuevos estudios.

## VIII. CONCLUSIONES

- a. La complejidad de factores como la topografía, geología, humedad y fitogeografía de la Sierra de las Minas Costa Suroriente del país, reflejan la necesidad de mapas no generalizados.
- b. El gradiente estudiado con base de datos de GBIF dio un perfil detallado de la complejidad de la composición florística del país y los distintos factores ambientales que se relacionan en la generación de pisos ambientales.
- c. Los pisos del estudio están dominados por familias de origen Laurásico seguido de Amazónico y Andino Norte.
- d. Se generaron 26 pisos ambientales en el gradiente altitudinal de Sierra de las Minas Costa Suroriente de Guatemala.
- e. La frecuencia de especies de Andino Sur coinciden con lo encontrado por López (2019) ya que están en todos los pisos pero en frecuencias medias y no dominantes.
- f. De forma cualitativa los tres grandes grupos (Costa Sur, Centro Seco y Sierra de las Minas) están relacionados fuertemente con la geología de la región, evidenciando cambios en los pisos generados de forma latitudinal, por lo que es imperativo generar un estudio que incluya factores cualitativos.
- g. Se evidencia un mayor cambio entre los pisos de Norte a Sur, habiendo una clara homogeneidad entre pisos de Este a Oeste.
- h. La riqueza de especies endémicas es mayor en el Centro Seco, en contraste con la riqueza total de especies que es mayor en la zona de la Costa Sur.

## **IX. RECOMENDACIONES**

Los análisis en la vegetación y las variables ambientales que influyen en su distribución, composición y ecosistemas ideales, son importantes para evaluar las alteraciones que pueden sufrir en respuesta ante el cambio climático. Por ende, es imperativo dar continuidad al presente estudio, incluyendo más variables y otras zonas del país.

La metodología que se generó surgió a partir de un vacío de información encontrado en el proceso de documentación de investigaciones realizadas, obteniendo 30 estudios los cuales al ser depurados sólo quedaron 13 que poseían la información necesaria para la generación de la base de datos. Aún hay muchas zonas que necesitan ser documentadas o generar recuentos con información más sistemática ya que los datos no cubrían de forma homogénea el área, centrándose en la Costa Sur y Sierra de las Minas, siendo escasos en el centro.

Por tal razón se buscó generar la metodología con el uso de bases de datos que brindaron la información requerida para estudios de fitogeografía. Sin embargo, estos aún requieren de un esfuerzo grande de limpieza y transformación para un análisis óptimo. En vista de los anterior se recomienda generar un protocolo estandarizado para la metodología y el análisis de las bases de datos de GBIF y generar más investigaciones para el resto del país bajo una metodología estandarizada, sencilla y eficaz.

La complejidad encontrada en el gradiente del presente estudio evidencia cómo múltiples factores (topografía, geología, humedad y fitogeografía), reflejan la necesidad de mapas no generalizados para la composición florística, debido a los cambios drásticos de las condiciones ambientales a lo largo del gradiente. Por ende, se recomienda implementar el uso de bases de datos de GBIF y la metodología generada en este estudio para el resto del país y así determinar cómo se comportan los pisos ambientales con una base de registros amplia y detallada; permitiendo generar un perfil fitogeográfico completo del país y luego poder extenderlo al resto de Mesoamérica.

## X. LITERATURA CITADA

Avendaño, C. 2012. *Natural and cultural landscape evolution during the Late Holocene in North Central Guatemalan Lowlands and Highlands*. Tesis de doctorado en Filosofía, Departamento de Geografía, Universidad de Toronto.

Alcaraz, F.;Clemente, M.;Barreña, J. y Álvarez, R. 1999. Manual de teoría y práctica de Geobotánica. ICE Universidad de Murcia.

Aramaki S, Ui T. 1966. *The Aira and Ata pyroclastic flows and related caldera and depressions in southern Kyushu, Japan*. *Bulletin Volcanologique* 29: 29–47.

Bachmann O, Bergantz GW. 2003. *Rejuvenation of the Fish Canyon magma body: a window into the evolution of large-volume silicic magma system*. *Geology* 31: 789–792.

Bachmann O, Charlier BLA, Lowenstern JB. 2007. *Zircon crystal- lization and recycling in the magma chamber of the rhyolitic Kos Plateau Tuff (Aegean arc)*. *Geology* 35: 73–76.

Bacon CR, Lowenstern JB. 2005. *Late Pleistocene granodiorite source for recycled zircon and phenocrysts in rhyodacite lava at Crater Lake, Oregon*. *Earth and Planetary Science Letters* 233: 277–293.

Bonis S, Bohnenberger O, Stoiber RE et al. 1966. *Age of pumice deposits in Guatemala*. *Geological Society of America Bulletin* 77: 211–212.

Bacon C.; D. Silvestro; C. Jaramillo; B. Smith; P. Chakrabarty y A. Antonelli. 2015. *Biological evidence supports an early and complex emergence of the Isthmus of Panama*. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112(19): 6110-6115.

Bacon, c. Y Lowenstern, j. 2005. *Late Pleistocene grandiorite source for recycled zircon and phenocrysts in rhtodacite lava at Crater Lake, Oregon*. *Earth and Planetary Science Letters* 233:277-293

Barry, R. (2008). *Mountain weather and climate*. New York: Cambridge University Press.

Campbell, J. 1982. *The Biogeography of the cloud forest herpetofauna of middle America, with special to the Sierra de las Minas, of Guatemala*.

Cano, E. 2004. *Biodiversidad, endemismo y biogeografía de la entomofauna de los bosques secos de Guatemala*. En: A. Najera (ed). I Seminario de Investigaciones para la conservación de la región semiárida del Valle del Motagua: Libro de resúmenes. FDN/TNC, pp. 21-22

CECON.1995. *Áreas de interés para la conservación en Guatemala*, Centro de Datos para la Conservación, Centro de Estudios Conservacionistas, The Nature Conservancy. Guatemala

CONAP-ZOOTROPIC-CECON-TNC.2011. Plan de Conservación de las Regiones Secas de Guatemala. Editores: D. Ariano y E. Secaira. Documento Técnico No.99 (01-2011). Guatemala. 76pp.

Chiquin, M. y Requena, F. 2001. Mapeo geológico de superficie del cuadrángulo granados, escala 1: 50,000. Tesis de licenciatura en geología, Departamento de Geología, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Correa, A., Bush, M. y Pérez, A. 2011. *Pollen distribution along climatic and biogeographic gradients in northern Central America*. The Holocene 21(4): 681-692

Coates, A. (1997). Central America: a natural and cultural history. New Haven, Yale University Press p. 277.

Cristobal, C., Pinochet E., & Ruiz, E. (2020). *Distribution of Orchidaceae in Chile: bioclimatic modeling and georeferenced database from GBIF*. Ecology and Evolution, 10 (17), p.9177-9193.

Departamento de Ingeniería Forestal, Universidad de San Carlos de Guatemala. Pelegrin, J.; S. Gamboa; I. Menéndez y M. Hernández. 2018. El Gran Intercambio Biótico Americano: Una revisión paleoambiental de evidencias aportadas por mamíferos y aves neotropicales. Revista Ecosistemas 27(1):5-17.

De la Torre, L., Navarro, L., Gómez, J. y Perfectti, F. 2016. *The effect of elevation on floral traits and reproductive output in high mountain plants: revisiting Darwin's visit to Granada*. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 20, 35-45.

Dix, M., 1993. *Sierra de las Minas Region and Biosphere Reserve*. Smithsonian Institution

Fourcade, J., Mendez, J., Azema, J., Romero, J. 1999. *The K/T boundary in Southwestern Petén (Guatemala)*. Accadémie des Sciences Paris. Earth & Planetary Sciences. Stratigraphy. 325 pp. 57-64

Gillson, L. 2016. *Biodiversity Conservation and Environmental Change: Using Paleoecology to Manage Dynamic Landscapes in the Anthropocene*. Oxford University Press, Oxford. 215 pp.

Gentry, A. 1982. *Neotropical Floristic Diversity: Phytogeographical connections between central and South America, Pleistocene climatic fluctuations, or an accident of the Andean Orogeny?* Annals of the Missouri Botanical Garden 69(3): 557-593.

González- Muñoz. N., Catro, S., & Vadillo, L. 2019. *Distribution patterns and climatic drivers of Narcissus species in the Iberian Peninsula Scientia Horticulturae*, 243, 532-537.

Hammer, Ø.; D. Harper; P. Ryan. 2001. *PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis*. *Palaeontologia Electronica* 4(1): 9 pp.

Hart, J. 2000. *Impact and sustainability of indigenous hunting in the Itury forest, Congo-Zaire: a comparison of hunted and unhunted duiker populations*. Pp: 106-153, in *Hunting for sustainability in neotropical forests* (Robinson, J. G. y E. L. Bennett, eds.). Columbia University Press, New York, USA.

Hill, M. y H. Gauch. 1980. Detrended correspondence analysis: an improved ordination technique. *Vegetatio* 42: 47-58

Holland, S. 2008. *Detrended Correspondence Analysis (DCA)*. Department of Geology, University of Georgia, Athens, GA. 9 pp.

Iturralde-Vinent, M. 2006. El origen paleogeográfico de la biota de Guatemala. En: Cano, E. (ed.) *Biodiversidad de Guatemala 1*. Universidad del Valle de Guatemala, Guatemala, pp 1-6.

INAB, CONAP, MAGA, MARN, UVG Y URL. 2019. Cobertura forestal de Guatemala 2016 y dinámica de cobertura forestal 2010-2016. Guatemala: Revolorio, A., Paredes, E., Gómez, D., Rosales, K., Gálvez, J. Ramos, H., Chávez, S., Stewart, J. Albunez, E.

Janzen, D. 1967. *Why mountains passes are higher in the tropics*. *The American Naturalist* 101(919): 233-249.

Jacobs, M. 1974. *Botanical panorama of the Malesian archipelago*. UNESCO publ. "Natural Resources in Humid Tropical Asia." Pp.: 263-294

Kinney, P. 2018. *Interactions of climate change, air pollution, and human health*. *Current Environmental Health Report* 5(1): 179-186.

Klemetti EW, Deering CD, Cooper KM et al. 2011. *Magmatic perturbations in the Okataina Volcanic Complex, New Zealand at thousand-year timescales recorded in single zircon crystals*. *Earth and Planetary Science Letters* 305: 185–194.

Koch AJ, Mclean H. 1975. *Pleistocene tephra and ash-flow deposits in the volcanic highlands of Guatemala*. *Geological Society of America Bulletin* 86: 529–541.

Kubitzki, K. 1975. *Relationships between distribution and evolution in some heterobathmic tropical groups*. *Botanische Jahrbücher für Systematik* 96:212-230.

Kutterolf S, Schindlbeck JC, Anselmetti FS et al. 2016. *A 400-ka tephrochronological framework for Central America from Lake Petén Itzá (Guatemala) sediments*. *Quaternary Science Reviews* 150: 200–220.

Kessler, M., Herzog, S. & La Riva, J. 2001. *Elevational gradients of species richness, endemism and composition of birds and altitudinal distribution of endemic bird species in Bolivia*. *Biodiversity and Conservation*, 10(9), 1675-1702.

Lavin, M. 2006. *Floristic and geographical stability of discontinuous seasonally dry tropical forests explains patterns of plant phylogeny and endemism*. En: T. Pennington, G. Lewis y J. Ratter. (eds). *Neotropical savannas and seasonally dry forests: plant diversity, biogeography, and conservation*. CRC press, pp. 433-448

Lawley, Y. & Sword, G. 2016. *Endophyte diversity in natural populations of grasses along a precipitation gradient in the Great Plains*. *Ecology and Evolution*, 6(19), 7213-7224.

Ledbetter M. 1982. Tephrochronology at Sites 502 and 503. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project* 68: 403–408.

Lachniet, M. y A. Roy. 2011. *Costa Rica and Guatemala*. En: Ehlers, J.; P. Gibbard y P. Hughes. *Quaternary Glaciations - Extent and Chronology*. A closer look. Elsevier

Lohse, J.; W. Hamilton; M. Brenner; J. Curtis; T. Inomata; M. Morgan; K. Cardona; K. Aoyama y H. Yonenobu. 2018. *Late Holocene volcanic activity and environmental change in Highland Guatemala*. *Quaternary Science Reviews* 191: 378-392

Martens, U. 2009. *Geologic evolution of the Maya Block (southern edge of the North American Plata): An example of terrane transferal and crustal recycling*. Tesis Doctor en Filosofía. USA: Universidad de Stanford, Departamento de Geología y Ciencias Ambientales.

Mandujano, S. 2004. Análisis bibliográfico de los estudios de venados en México. *Acta Zoológica Mexicana* (n.s.), 20:211-251.

MAGA (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación). 2005. *Atlas temático de la República de Guatemala*. Guatemala, 127 pp.

Marchant, R.; J. Berrio; A. Cleef; J. Duivenvoorden; K. Helmens; H. Hooghiemstra; P. Kuhry; B. Melief; E. Schreve-Brinkmana; B. Van Geela; G. Van Reenena y T. Van der Hammen. 2001. *A reconstruction of Colombian biomes derived from modern pollen data along an altitude gradient*. *Review of Palaeobotany and Palynology* 117(1–3): 79–92.

Oliveira, A., Curi, N., y Vilela, E. 2019. *Environmental determinants of woody species composition, beta diversity, and phytogeographical patterns in gallery forests across central Brazil*. *Journal of Biogeography*, 46 (5), 1030-1043.

Palacios, M. 2004. Diagnóstico de la subcuenca del río Xequijel, Cuenca del Samalá, del Departamento de Quetzaltenango. Reporte de Ejercicio Profesional Supervisado.

PANIAGUA, H. 1980. Una contribución al estudio de *Cactaceae* en el bosque de El Progreso, Guatemala. Tesis Biólogo. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. 110 p.

Pezo, D. 2008. Ganadería sostenible en los bosques secos de Guatemala. En: P. Negreros (ed). II Seminario de Investigaciones para la conservación y desarrollo sostenible de los bosques secos de Guatemala, con énfasis en la región semiárida del Valle del Motagua: Libro de resúmenes. FDN/TNC, Pp.41.

SECAIRA E, P. PRADO Y S. PEREZ. 2003. Plan de conservación de la región semiárida del Valle del Motagua. Informe Final Defensores de la Naturaleza, TNC, USAID. 48 p.

Sarukhan, J. 1968. Análisis sinecológico de las selvas de Terminalia amazonia en la Planicie Costera del Golfo de México. Tesis, Escuela Nacional. Agricultura Chapingo, Mexico. 300 pp.

Sauer, D. 1988. Plant migration: The dynamics of geographic patterning in seed plant species. University of California Press, Berkeley. 298 pp.

Schuster, J.C., E.B. Cano, y C. Cardona. 2000. Un método sencillo para priorizar la conservación de los bosques nubosos de Guatemala, usando Passalidae (Coleoptera) como organismos indicadores. Acta Zool. Mex. (n.s.), 80: 197-209.

Solari, L. 2013. Late Cretaceous subduction of the continental basement of the Maya Block (Rabinal Granite, central Guatemala): Tectonic implications for the geodynamic evolution of Central America. Geological Society of America Bulletin. 12 (4): 5-18

Suchini, A., Rosales, G. y Cazali, E. 2001. Estudio del endemismo florístico en la Reserva de las Minas. Centro de Estudios Conservacionistas de la Universidad San Carlos de Guatemala. CONCYT/FONACYT. Guatemala

Schindlbeck JC, Kutterolf S, Freundt A et al. 2018. Miocene to Holocene marine tephrostratigraphy offshore northern Central America and southern Mexico: pulsed activity of known volcanic complexes. Geochemistry, Geophysics, Geosystems 19: 4143–4173.

Schmitt AK. 2011. Uranium series accessory crystal dating of magmatic processes. Annual Review of Earth and Planetary Sciences 39: 321–349.

Schmitz MD, Bowring SA. 2001. *U–Pb zircon and titanite systematics of the Fish Canyon Tuff: an assessment of high-precision U–Pb geochronology and its application to young volcanic rocks.* Geochimica et Cosmochimica Acta 65: 2571–2587.

Schwartz, M. 2013. Phenology: An Integrative Environmental Science (2nd ed.). Dordrecht: Springer. doi: 10.1007/978-94-007-6925-0

Toledo, T. & García, J. 2018. *Elevational patterns of birds species richness and community composition in the Tehuacán- Cuicatlán Biosphere Reserve, Mexico*. Journal of Ornithology, 159 (1), 185- 198.

Trujillo, R. 2009. Impacto del cambio de uso del suelo sobre la diversidad de alacranes (Arachnida: Scorpiones) en el monte espinoso de la cuenca del río Motagua. Tesis de licenciatura en Biología. Universidad de San Carlos de Guatemala.

Universidad Nacional de la Plata [UNP] .(2012). Fitogeografía Mundial y Argentina. Extraído de: [https://sistematicavegetal.weebly.com/uploads/8/0/5/2/8052174/fitogeografia\\_mundial.pdf](https://sistematicavegetal.weebly.com/uploads/8/0/5/2/8052174/fitogeografia_mundial.pdf)

Veliz, M. 2010. *Determinación, caracterización y evaluación del estado actual y uso de las especies endémicas de Guatemala. Proyecto FODECYT 02-2010*. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Guatemala. choreographic analysis. Coleopts. Bull. 47(4): 363-408

Veliz, P. E. 1995. *Las Plantas como bioindicadoras de las zonas de vida de Guatemala*. (40) pp: 30-44

Vermeesch P. 2018. IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology. Geoscience Frontiers 9: 1479–1493.

Villaseñor, J. & Ortiz, E. 2019. Elevational patterns of angiosperm richness and its drivers in Mexico.

Wilson CJN, Houghton BF, Kampt PJJ et al. 1995. An exceptionally widespread ignimbrite with implications for pyroclastic flow emplacement. Nature 378: 605–607.

Wotzlaw J-F, Bindeman IN, Watts KE et al. 2014. Linking rapid magma reservoir assembly and eruption trigger mechanisms at evolved Yellowstone-type supervolcanoes. Geology 42: 807–810.

Webb S. 1985. *Faunal interchange between North and South America*. Acta Zoologica Fennica 170:177–178

Weber, M. 2005. *Ecology and conservation of sympatric tropical deer populations in the Greater Calakmul Region, Campeche, Mexico*. Tesis doctoral. Universidad de Durham, Reino Unido.

Weber, M. y S. Gonzalez. 2003. *Latin American deer diversity and conservation: a review of status and distribution*. Ecoscience, 10:443-454.

Wywiałowski, A. P. 1987. *Habitat structure and predators: choices and consequences for rodent habitat specialists and generalists*. Oecologia, 72:39-45.

Yanosky, A. A. y C. Mercolli. 1994. Estimates of brown brocket deer (*Mazama gouazoubira*) habitat use at El Bagual ecological reserve, Argentina. *The Texas Journal of Science*, 46:73- 78.

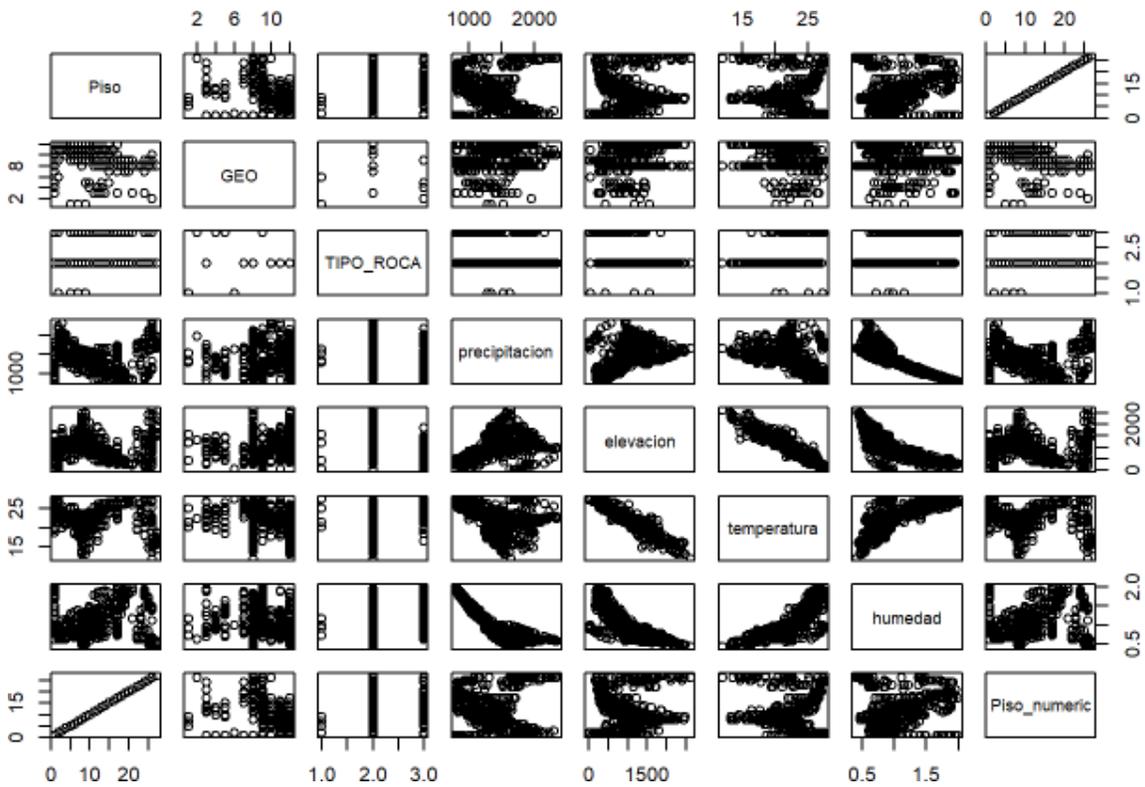
## XI. APÉNDICES

**Apéndice 1.** Pisos ambientales y el rango de altitud.

| Grupo perteneciente            | No. de pisos<br>ambientales | Rango de altitud     |
|--------------------------------|-----------------------------|----------------------|
| <i>COSTA SUR</i>               | 1                           | 0 msnm – 1200msnm    |
|                                | 2                           | 600msnm – 1900msnm   |
|                                | 3                           | 600 msnm – 1300 msnm |
|                                | 4                           | 400 msnm – 1300 msnm |
|                                | 5                           | 400 msnm – 1800msnm  |
|                                | 6                           | 700 msnm – 1800 msnm |
|                                | 7                           | 800 msnm – 2300msnm  |
|                                | 8                           | 900 msnm – 2000 msnm |
|                                | 9                           | 600 msnm – 2100 msnm |
|                                | 10                          | 500 msnm – 1600 msnm |
|                                | 11                          | 400 msnm – 900 msnm  |
|                                | 12                          | 500 msnm – 1600 msnm |
|                                | 13                          | 400 msnm – 1500 msnm |
| <i>CENTRO SECO</i>             | 14                          | 400 msnm – 900 msnm  |
|                                | 15                          |                      |
| <i>SIERRA DE LAS<br/>MINAS</i> | 16                          | 300 msnm – 1300 msnm |
|                                | 17                          | 200 msnm – 1900 msnm |
|                                | 18                          | 200 msnm – 2500 msnm |
|                                | 19                          | 200 msnm – 2100 msnm |
|                                | 20                          | 247msnm – 2100 msnm  |
|                                | 21                          | 200 msnm – 1700 msnm |
|                                | 22                          | 230 msnm – 2100 msnm |
|                                | 23                          | 170 msnm – 2400 msnm |
|                                | 24                          | 170 msnm – 2500 msnm |
|                                | 25                          | 170 msnm – 2300 msnm |
|                                | 26                          | 170 msnm – 2500 msnm |

**Apéndice 2** Análisis de correlación y valores de  $R^2$  para las variables ambientales y los 26 pisos.

| ##   | Variable      | Correlation        | R_squared          |
|------|---------------|--------------------|--------------------|
| ## 1 | precipitacion | 0.194284578588737  | 0.0377464974774032 |
| ## 2 | elevacion     | 0.143462299275287  | 0.0205814313133519 |
| ## 3 | temperatura   | -0.145888025026955 | 0.0212833158462656 |
| ## 4 | humedad       | -0.164746292480246 | 0.0271413408859868 |
| ## 5 | Piso_numeric  | 1                  | 1                  |



**Apéndice 3.** Códigos de R student para la limpieza de la base de datos de GBIF para el análisis fitogeográfico.

```
#Definir el directorio de trabajo##  
  
setwd("/Users/usuario/Documents/UVG/Tesis/majo_ortiz/analisis")  
  
#cargar paquetes####  
  
library(reshape2)  
  
library(dplyr)  
  
library(ggplot2)  
  
library(reshape2)  
  
#limpiar la base de datos####  
  
##cargar la base de datos original#  
  
base_plantas <- read.csv("Base_de_datos.csv", na.strings = "")  
  
parcelas <- read.csv("Pisos.csv", na.strings = "")  
  
##extraer las columnas necesarias y generar una nueva base  
  
base_plantas_limpiar <- base_plantas[, c("TARGET_FID", "Individuos",  
"RASTERVALU", "ORIG_FID")]  
  
##Eliminar duplicados  
  
duplicate_rows <- duplicated(base_plantas_limpiar[c("Individuos", "RASTERVALU",  
"ORIG_FID")])  
  
base_plantas_limpiar <- base_plantas_limpiar[!duplicate_rows, ]## Mezclar base_plantas_limpiar y  
parcelas basado en ORIG_FID  
  
union_parcelas <- merge(base_plantas_limpiar, parcelas, by = "ORIG_FID", all.x = TRUE)  
  
## agregar "piso" a base_plantas_limpiarbase_plantas_limpiar$Piso <- union_parcelas$Piso  
  
##filtrar los NAs
```

```

base_plantas_limpia <- base_plantas_limpia[complete.cases(base_plantas_limpia$ piso), ]

##agregar familia###

raw_data <- read.csv("raw_data.csv", na.strings = "")

##extraer valores de familia y especie

especies <- raw_data[, c("family", "species")]

##eliminar los duplicados

esp_dups <- duplicated(especies[, c("species")])

especies <- especies[!esp_dups, ] # Remueve los duplicados

## agregar columna de familia

head(especies)

head(base_plantas_limpia)

## Unir los dos data frames por el valor de Individuos

# unir las dos conjuntos de datos por individuos

union_especies <- merge(base_plantas_limpia, especies, by.x = "Individuos", by.y = "species",
all.x = TRUE)

# Reordenar las columnas para que vaya familia antes de individuos

base_plantas_limpia <- union_especies[, c("TARGET_FID", "family", "Individuos",
"RASTERVALU", "ORIG_FID", "piso")]

```

```

# revisar que esté bien

head(base_plantas_limpia)

#agregar origen fitogeografico

origen_raw <- read.csv("origen_raw.csv", na.strings = "")

head(origen_raw)

origen_dups <- duplicated(origen_raw[, c("Familia")])sum(origen_dups)

origen_raw_clean <- origen_raw[!origen_dups,c("Origen.fitogeográfico", "Familia") ] #
Remueve los duplicados

# unir las bases de datos por 'family' y 'Familia'

origen <- merge(base_plantas_limpia, origen_raw_clean, by.x = "family", by.y = "Familia", all.x
= TRUE)

# renombrar la columna 'origen_fito'

origen <- rename(origen, origen_fito = Origen.fitogeográfico)

#revisar los datos

head(origen)

base_plantas_limpia <- origen

##corregir los nombres de las columnas

colnames(base_plantas_limpia)[1] <- "familia"

colnames(base_plantas_limpia)[2] <- "ID"

colnames(base_plantas_limpia)[3] <- "especie"

colnames(base_plantas_limpia)[4] <- "elevacion"

colnames(base_plantas_limpia)[5] <- "parcela"

colnames(base_plantas_limpia)[7] <- "origen_cod"

head(base_plantas_limpia)

```

```

# Create a new column 'origen' based on the values of 'origen_fito'
base_plantas_limpiar$origen <- ifelse(base_plantas_limpiar$origen_cod == 1, "Laurasico",
                                     ifelse(base_plantas_limpiar$origen_cod == 2, "Amazonico",
                                             ifelse(base_plantas_limpiar$origen_cod == 3, "Andino Norte",
                                                    ifelse(base_plantas_limpiar$origen_cod == 4, "Andino Sur",
                                                           ifelse(base_plantas_limpiar$origen_cod == 5, "Miscelaneo",
                                                                NA))))))

# View the updated data frame
head(base_plantas_limpiar)

##guardar el CSV
base_plantas_limpiar <- base_plantas_limpiar[complete.cases(base_plantas_limpiar$origen_cod), ]

write.csv(base_plantas_limpiar, "base_limpiar.csv", row.names = FALSE)

#Crear las gráficas por piso y origen#####

# Contar la frecuencia de cada valor unico en 'origen' para cada valor único en 'piso'
frequency_table <- table(base_plantas_limpiar$piso, base_plantas_limpiar$origen)

# mostrar la tabla de frecuencia
print(frequency_table)

# Convertir la tabla de frecuencia a data frame
frequency_df <- as.data.frame(frequency_table)

# renombrar las columnas
colnames(frequency_df) <- c("piso", "origen", "count")

# Rearmar el data frame para que esté en formato largo

```

```

frequency_long <- melt(frequency_df, id.vars = c("piso", "origen"))

# calcular el conteo total para cada piso

frequency_long <- frequency_long %>%

  group_by(piso) %>%

  mutate(total_count = sum(value))

# Calcular los porcentajes

frequency_long <- frequency_long %>% mutate(percentage = (value / total_count) * 100)

# crear la figura de barras

plot <- ggplot(data = frequency_long, aes(x = piso, y = percentage, fill = origen)) +

  geom_bar(stat = "identity", position = "stack") +

  labs(x = "Piso", y = "Porcentaje", fill = "Origen") +

  scale_fill_brewer(palette = "Set1") +

  theme_minimal()

# Agregar los porcentajes y ajustar los detalles de la figura y eliminar los porcentajes que son 0

plot <- plot + geom_text(data = subset(frequency_long, percentage != 0),

  aes(label = paste0(round(percentage, 1), "%")),

  position = position_stack(vjust = 0.5),

  color = "white",

  size = 2.5,

  angle = 270) # Adjust the size value here

#generar la figura

```

```
plot

# crear la matrix por pisos#####

# Crear un indicador binario de variables para presencia

base_plantas_limpia$presence <- 1

# Crear un nuevo data frame con el indicador binario de variables

presence_data <- base_plantas_limpia[, c("especie", "piso", "presence")]

# remover duplicados

presence_data <- unique(presence_data)

# rehacer el data frame para crear la matriz

matrix_data <- dcast(presence_data, especie ~ piso, value.var = "presence", fill = 0)

# Fijar los nombres como "especie"

rownames(matrix_data) <- matrix_data$especie

matrix_data$especie <- NULL

# generar la matriz resultante

print(matrix_data)

write.csv(matrix_data, "matrix_pisos.csv", row.names = FALSE)
```

**Apéndice 4.** Código de R. para el análisis de correlación y generación de cajas de bigotes para las variables ambientales analizadas.

```
library(readxl)

library(tidyverse)

library(zoo)

#Base de datos#

d0 <- read_xlsx("C:/Users/user/Desktop/majo.xlsx")

# Seleccion de columnas / variables a utilizar

d1 <- select(d0,Piso,GEO,TIPO_ROCA,precipitacion,elevacion,temperatura,humedad) %>%

  mutate(Piso=as.factor(Piso),

         GEO=as.factor(GEO),

         TIPO_ROCA=as.factor(TIPO_ROCA),

         precipitacion=as.numeric(precipitacion),

         humedad=as.numeric(humedad))

d1$precipitacion <- na.approx(d1$precipitacion)

d1$humedad <- na.approx(d1$humedad)

par(mfrow = c(2, 2), mar = c(4, 4, 2, 1), oma = c(0, 0, 2, 0))

plot1 <- ggplot(d1, aes(x = Piso, y = precipitacion, fill = GEO)) +

  geom_boxplot() +

  labs(title = "Boxplot de Precipitación por Piso", x = "Piso", y = "Precipitación") +

  theme_minimal() +

  theme(legend.position = "bottom")
```

```

plot2 <- ggplot(d1, aes(x = Piso, y = elevacion, fill = GEO)) +
  geom_boxplot() +
  labs(title = "Boxplot de Elevación por Piso", x = "Piso", y = "Elevación") +
  theme_minimal() +
  theme(legend.position = "bottom")

plot3 <- ggplot(d1, aes(x = Piso, y = temperatura, fill = GEO)) +
  geom_boxplot() +
  labs(title = "Boxplot de Temperatura por Piso", x = "Piso", y = "Temperatura") +
  theme_minimal() +
  theme(legend.position = "bottom")

plot4 <- ggplot(d1, aes(x = Piso, y = humedad, fill = GEO)) +
  geom_boxplot() +
  labs(title = "Boxplot de Humedad por Piso", x = "Piso", y = "Humedad") +
  theme_minimal() +
  theme(legend.position = "bottom")

print(plot1)

d1$Piso_numeric <- as.numeric(as.factor(d1$Piso))

cor_data <- d1 %>%
  select_if(is.numeric)

```

```
correlation_results <- data.frame(
  Variable = character(),
  Correlation = double(),
  R_squared = double(),
  stringsAsFactors = FALSE)

for (col in names(cor_data)) {
  cor_test <- cor.test(d1$Piso_numeric, d1[[col]], method = "pearson")
  cor_value <- cor_test$estimate
  r_squared <- cor_value^2
  correlation_results <- rbind(correlation_results, c(col, cor_value, r_squared))
}

colnames(correlation_results) <- c("Variable", "Correlation", "R_squared")
print(correlation_results)
```

## Apéndice 5. Depuración bases de datos especies endémicas.

```
cargar librerias
```

```
library(stringr)
```

```
library(dplyr)
```

```
#cargar las especies y el listado
```

```
endemicas <- read.csv("Documents/UVG/Tesis/majo_ortiz/analisis/edemismo/Listado de especies endemicas.csv")
```

```
#elimina los espacios en blanco al final de la especie
```

```
endemicas$Especie <- str_trim(endemicas$Especie, side = "right")
```

```
base_final <- read.csv("~/Documents/UVG/Tesis/majo_ortiz/analisis/edemismo/base_final.csv", na.strings="")
```

```
base_final$Individuos <- str_trim(base_final$Individuos, side = "right")
```

```
parcelas <- read.csv("~/Documents/UVG/Tesis/majo_ortiz/analisis/edemismo/parcelas_total_R.csv", na.strings="")
```

```
#corregir los nombres
```

```
names(base_final)[names(base_final) == 'Individuos'] <- 'especie'
```

```
names(endemicas)[names(endemicas) == 'Especie'] <- 'especie'
```

```
#usar el listado de especies endemicas para agregar a la base final si son o no endémicas.
```

```
#agregar 1 si la especie en la base final se encuentra en el listado de especies endémicas
```

```
base_final$endemica <- ifelse(base_final$especie %in% endemicas$especie, 1, 0)
```

```
#revisar
```

```
head(base_final)
```

```
head(endemicas)
```

```
head(parcelas)
```

```

#extraemos de la base final solo las especies endémicas

filtered_base_final <- subset(base_final, endemica == 1)

#nos quedamos con los valores únicos

unique_filtered_base_final <- filtered_base_final %>%

distinct(ORIG_FID, .keep_all = TRUE)

#agregar una columna para las parcelas donde diga si contienen o no especies endémicas

parcelas$endemicas <- ifelse(parcelas$ORIG_FID %in% unique_filtered_base_final$ORIG_FID,
1, 0)

#exportar los datos

write.csv(parcelas, file =
"/Users/usuario/Documents/UVG/Tesis/majo_ortiz/analisis/edemismo/parcelas_endemismo.csv"
, row.names = FALSE)

write.csv(base_final, file =
"/Users/usuario/Documents/UVG/Tesis/majo_ortiz/analisis/edemismo/especies_endemismo.csv"
, row.names = FALSE)

```