



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**ANÁLISIS MORFOLÓGICO FLORAL DE *ZEPHYRANTHES ALBA*  
(AMARYLLIDACEAE) EN DISTINTAS POBLACIONES DEL  
PEDREGAL DE SAN ÁNGEL DE LA CIUDAD DE MÉXICO DESDE  
UNA PERSPECTIVA DE MORFOMETRÍA GEOMÉTRICA**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**B I Ó L O G A**

**P R E S E N T A:**

**ANA KEREN ALVA SANDOVAL**



**DIRECTORA DE TESIS:  
LUCÍA YOSCELINA CENTENO BETANZOS  
CO-TUTOR: OSCAR ANGEL DE LUNA BONILLA  
CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. DE MX., 2023**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

## HOJA DE DATOS DEL JURADO

### 1. Datos del alumno

Alva

Sandoval

Ana Keren

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Biología

315257542

### 2. Datos del tutor

M. en C.

Lucía Yoscelina

Centeno

Betanzos

### 3. Datos del sinodal 1

Dr.

Leonardo Osvaldo

Alvarado

Cárdenas

### 4. Datos de sinodal 2

M. en C.

Oscar Angel

De Luna

Bonilla

### 5. Datos de sinodal 3

Dr.

Abisai Josué

García

Mendoza

### 6. Datos de sinodal 4

Dra.

Helia Reyna

Osuna

Fernández

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por hacerme crecer desde hace ya varios años a través del conocimiento impartido en sus aulas y por sus docentes. Así como un crecimiento emocional por medio de la compañía de personas excepcionales.

A la M. en C. Lucía Centeno, por apoyarme, escucharme y orientarme durante estos años con paciencia, respeto y calidez, una gran docente.

A mi co-tutor Oscar De Luna por su paciencia, su retroalimentación y su enseñanza.

Al Chilpa-lab por su retroalimentación, sus consejos y su compañía.

A los sinodales, el Dr. Leonardo Alvarado, el Dr. Abisáí García y a la Dra. Reyna Osuna, por sus comentarios llenos de conocimiento, por atender mis dudas y estar al pendiente en este proceso.

A la maestra Guadalupe Hurtado, quien con su manera de impartir el conocimiento, me impulsó hasta este camino de la biología.

## AGRADECIMIENTOS A TÍTULO PERSONAL

Agradezco primordialmente a Dios por permitirme llegar hasta este punto. Por los muchos o pocos logros que me ha permitido tener y por las personas tan bonitas con las que he podido coincidir. Todo es de ti y todo es para ti.

A mi familia cercana. A mi mamá y a mi papá: Por encaminarme de la mejor manera posible, por compartirme de su sabiduría, llenándome de amor, cariño y de un apoyo incondicional. Les debo mucho por todo lo que han hecho por mí, Lilia y Antonio, les admiro mucho y son unos padres maravillosos. A ser el más enojón del mundo, a mi hermano, por sus ocurrencias, por ser mi compañero de vida y por estar siempre presente. Les amo mucho.

A mi familia Sandoval, por su compañía llena de sus características risas escandalosas y una calidez que no siento de la misma manera en ningún otro lugar.

A mis amigas por haber estado conmigo directa o indirectamente en este borrascoso y hermoso camino. A la comunicóloga Fanny Saucedo, por estar desde hace unos años siempre al pendiente de mí pese a la distancia física. A la psicóloga Lupita Vázquez, con la que viví el primer acercamiento a la independencia y por ser incondicional conmigo.

A las científicas: Ale Tovar por sus amplios consejos, apoyo y todo su cariño, a la bióloga Karen Paredes por estar a mi lado en todo tipo de momentos llenos de aventuras, a Fania Santiago por siempre llenarme de amor y ternura, siendo la más olvidadiza, a Sandy Zarate (últimamente más godín) por tener un humor increíble y una vibra tan bonita que llena el corazón de todos y para cerrar con broche de oro, a una de las biólogas más amables e inteligentes que he conocido, por su apoyo y compañía, Dany Martínez.

Asimismo al resto de amigos y amigas de la facultad, con los que compartí prácticas de campo, chismes en los pasillos, trabajo en los laboratorio y estrés al final del semestre. ¡Son increíbles!

A ti, Loris. Te integraste en la parte final (la más complicada) de esta aventura. Por ser el más precioso del mundo, por creer en mí, cuidarme y animarme todo el tiempo. Por estar conmigo en cada buen y mal momento. Jtm, mon chéri.

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	10
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	11
<b>2. ANTECEDENTES</b> .....	14
2.1 <i>Zephyranthes alba</i> (Amaryllidaceae) .....	14
2.1.1 Morfología y fenología.....	14
2.1.2 Distribución .....	17
2.1.3 Modificaciones taxonómicas.....	19
2.2 Morfometría .....	22
2.2.1 Morfometría tradicional.....	23
2.2.2 Morfometría geométrica .....	24
<b>3. JUSTIFICACIÓN</b> .....	26
<b>4. OBJETIVOS</b> .....	27
<b>5. HIPÓTESIS</b> .....	28
<b>6. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	29
6.1 Muestras, montaje y agrupación de ejemplares de <i>Z. alba</i> .....	29
6.2 Análisis de morfometría geométrica.....	34
6.2.1 Análisis Generalizado de Procrustes (GPA) .....	37
6.2.2 Análisis de Componentes Principales (PCA).....	38
<i>Análisis de Componentes Principales Entre Grupos (bgPCA)</i> .....	38
<i>Gradillas de deformación</i> .....	39
6.3 ANOVA.....	40
<b>7. RESULTADOS</b> .....	41

7.1 Análisis Generalizado de Procrustes (GPA) .....	41
7.2. Análisis de Componentes Principales (PCA y bgPCA) y gradillas de deformación ...	43
7.3 ANOVA.....	48
<b>8. DISCUSIÓN</b> .....	<b>49</b>
<b>9. CONCLUSIONES</b> .....	<b>54</b>
<b>10. REFERENCIAS</b> .....	<b>55</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** *Zephyranthes alba*. Ciudad de México, Zona Arqueológica de Cuicuilco. a) Planta completa, se observan las raíces (R), el bulbo (Bl), el escapo (E), la bráctea (Br) y la flor; b) Flor completa; c) Individuos de la especie..... 15
- Figura 2.** Estructuras florales de *Z. alba*. Ciudad de México, Zona Arqueológica de Cuicuilco. a) Disección floral: separación de tépalos externos (\*) y tépalos internos (\*\*), verticilos reproductivos, detalle de la bráctea y las hojas; b) Flor completa; c) Corte longitudinal de la flor: detalle de la dimensión y organización de los verticilos florales. .... 16
- Figura 3.** Comparación entre mediciones llevadas a cabo por métodos de morfometría tradicional y mediciones realizadas con base en métodos de morfometría geométrica. a) A partir de un único punto se trazan mediciones lineales a diferentes partes del organismo; b) Se colocan marcas en sitios claves de la hoja, cada una contiene un par de coordenadas para delimitar la forma de esta. Imagen ilustrativa realizada por Keren Alva..... 25
- Figura 4.** Mapa de los seis sitios de colecta de *Z. alba* (marcas amarillas) en el Pedregal de San Ángel, Ciudad de México. Imagen satelital obtenida del servidor *Google Earth* (Consultado el 10/02/2023). .... 31
- Figura 5.** *Z. alba* en tres sitios de colecta. a) Individuos de la especie localizados cerca del JB; b) Detalle de la flor en el IQ; c) Individuos de la especie en el IQ; d) Detalle de la flor en crecimiento en MU. Fotos: Lucía Centeno. .... 32
- Figura 6.** Escaneo y digitalización de imágenes de las estructuras florales de *Z. alba*. Verticilos florales: tres tépalos externos, tres tépalos internos, seis estambres y un gineceo. .... 33
- Figura 7.** Ejemplo de la digitalización de marcas y trazado de curvas en un tépalo externo en el programa TPSDig. Tres marcas (color blanco): La primera localizada en el ápice del tépalo, y las otras dos en el lado izquierdo y derecho de la base del tépalo. Asimismo, cada una de las curvas (líneas en color negro) se pusieron 35 marcas para cubrir la forma del tépalo... 36

**Figura 8.** Análisis de Procrustes de los tépalos externos. Agrupación de los individuos de los seis sitios de estudio. Marcas en color negro: define la forma promedio de los 315 tépalos analizados. Marcas en color gris: representan la forma de cada tépalo analizado. .... 41

**Figura 9.** Análisis de Procrustes de los tépalos internos. Agrupación de los seis sitios de estudio. Marcas en color negro: define la forma promedio de los 315 tépalos analizados. Marcas en color gris: representan la forma de cada tépalo analizado. .... 42

**Figura 10.** Gráfico del Análisis de Componentes Principales (PCA) de los tépalos externos. Sitio 1: IQ (Instituto de Química); Sitio 2: FV (Facultad de Veterinaria); Sitio 3: MU (Metrobús universidad); Sitio 4: ZAC (Zona Arqueológica de Cuicuilco); Sitio 5: JB (Jardín Botánico); Sitio 6: BT (Bosque de Tlalpan). Gradillas de deformación en el eje horizontal: Valor positivo máximo y negativo mínimo para el componente principal 1 (PC-1 (54.9%)). Gradillas de deformación en el eje vertical: Valor positivo máximo y negativo mínimo para el componente principal 2 (PC-2 (19.2%)). Los sitios de la FV y del BT se diferencian ligeramente del resto, los cuatro sitios restantes están anidadas al inferior del gráfico sin que su forma pueda diferenciarse entre sí..... 44

**Figura 11.** Gráfico del Análisis de Componentes Principales Entre Grupos (bgPCA) de tépalos externos. Sitio 1: IQ; Sitio 2: FV; Sitio 3: MU; Sitio 4: ZAC; Sitio 5: JB; Sitio 6: BT. Gradillas de deformación en el eje horizontal: Valor positivo máximo y negativo mínimo para el componente principal 1 (PC-1 (59.7%)). Gradillas de deformación en el eje vertical: Valor positivo máximo y negativo mínimo para el componente principal 2 (PC-2 (26%)). Los sitios FV, BT y ZAC se separan y diferencian del resto. IQ, MU y JB, se aglutinan..... 45

**Figura 12.** Gráfico del Análisis de Componentes Principales (PCA) de los tépalos internos. Sitio 1: IQ; Sitio 2: FV; Sitio 3: MU; Sitio 4: ZAC; Sitio 5: JB; Sitio 6: BT. Gradillas de deformación en el eje horizontal: Valor positivo máximo y negativo mínimo para el componente principal 1 (PC-1 (53%)). Gradillas de deformación en el eje vertical: Valor positivo máximo y negativo mínimo para el componente principal 2 (PC-2 (16%)). La mayoría de los individuos se encuentran anidados en el centro, y solo algunos individuos del sitio 2 se separan del resto (presentan una forma ligeramente distinta)..... 46

**Figura 13.** Gráfico del Análisis de Componentes Principales Entre Grupos (bgPCA) de tépalos internos. Sitio 1: IQ; Sitio 2: FV; Sitio 3: MU; Sitio 4: ZAC; Sitio 5: JB; Sitio 6: BT. Gradillas de deformación en el eje horizontal: Valor positivo máximo y negativo mínimo para el componente principal 1 (PC-1 (67%)). Gradillas de deformación en el eje vertical: Valor positivo máximo y negativo mínimo para el componente principal 2 (PC-2 (15.2%)). Los sitios correspondientes a la FV y al MU presentan individuos que se separan del agrupamiento general. Los individuos de los demás sitios permanecen anidados por la similitud de su forma.

..... 47

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Diferencias morfológicas, citológicas y de distribución entre <i>Zephyranthes alba</i> y <i>Zephyranthes concolor</i> (Flagg et al., 2018; Flagg et al., 2019).....	21
<b>Tabla 2.</b> Abreviaciones, coordenadas geográficas y altitud de los sitios de colecta de <i>Z. alba</i> .....	30
<b>Tabla 3.</b> Resultados de la prueba estadística ANOVA de datos por individuo y ANOVA con los promedios de cada individuo para tépalos externos e internos.....	48

## RESUMEN

*Zephyranthes alba* (Amaryllidaceae) es una especie de planta endémica de la Ciudad de México, encontrada en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA), en la Zona Arqueológica de Cuicuilco y el Bosque de Tlalpan. Una de sus características es el color blanco de sus flores, las cuales brotan cuando caen las primeras lluvias del año entre los meses de abril y mayo, por lo que son conocidas popularmente como “mayitos”.

En un inicio los individuos de *Z. alba* de la REPSA fueron clasificados y denominados en varias fuentes como *Zephyranthes concolor* y posteriormente como *Habranthus concolor*, sin embargo, debido a diferencias morfológicas, citológicas y de distribución, recientemente dichos individuos fueron clasificados como *Z. alba*. Estos cambios taxonómicos suelen ser habituales en las *Zephyranthes*, en parte porque en algunas especies de este género los caracteres florales pueden presentar una alta plasticidad fenotípica, y dichos caracteres son importantes para su clasificación.

En el presente trabajo se realizó un estudio comparativo desde la morfometría geométrica para conocer si existe o no variación en los tépalos internos y externos de las flores de *Z. alba*, es decir, saber si son un carácter homogéneo o heterogéneo, debido a la alta plasticidad fenotípica que se ha reportado en las flores de *Zephyranthes*. Los resultados obtenidos indicaron que si bien existe variación en los tépalos externos e internos, estadísticamente no se encontraron diferencias significativas entre ellos con base en su forma. Por lo tanto, esta similitud indica desde la perspectiva morfométrica geométrica que en conjunto los tépalos internos y los tépalos externos son una característica homogénea en *Z. alba*, lo cual contribuye al conocimiento de su biología y la caracterización morfométrica de la especie.

## 1. INTRODUCCIÓN

---

Las amarilidáceas son hierbas perennes que en su mayoría son cultivadas y utilizadas como plantas de ornato en diferentes partes del mundo, ya que son características por la presencia de flores generalmente vistosas, las cuales pueden ser concoloras (blancas, rojas, amarillas, rosas, etc.) o bicoloras (blanco con rosa, blanco con amarillo) (García-Mendoza, 2021). Entre algunas generalidades de las especies de esta familia destacan los bulbos tunicados, solitarios o agrupados, las inflorescencias escamosas, la simetría de la flor es actinomorfa o zigomorfa, en cuanto a verticilos reproductivos estas son bisexuales: el androceo está compuesto por 6 estambres en 2 series de 3, mientras que el gineceo cuenta con un ovario ínfero generalmente 3-carpelar, 3-locular (Galván, 2005; García-Mendoza, 2021).

La familia está distribuida entre los trópicos y subtrópicos del planeta, mayormente diversa en Sudáfrica, en los Andes de Sudamérica y en el Mediterráneo (López-Ferrari y Espejo-Serna, 2002; Saliba, 2015; Judd et al., 2016). Albergan aproximadamente 900 especies dentro de 70 géneros, entre los principales géneros se encuentra *Crinum* L. con más de 120 especies, *Hippeastrum* Herb con 70 especies, *Cyrtanthus* W. Aiton, *Zephyranthes* Herb e *Hymenocallis* Salisb. con alrededor de 50 a 60 especies cada uno (García et al., 2014; Saliba, 2015; Judd et al., 2016). En México se tienen reportados cuatro géneros (*Hymenocallis*, *Crinum*, *Sprekelia* Heist. y *Zephyranthes*) con más de 80 especies (García-Mendoza, 2021).

En cuanto a su taxonomía, dentro de las Amaryllidaceae ha habido ciertas controversias y cambios sistemáticos con base en recursos morfológicos y moleculares. Entre estos está la propuesta de clasificar a Agapanthoideae y Amaryllidoideae como subfamilias de Amaryllidaceae (APG III, 2009; Chase et al., 2009). Aunque Judd et al., (2016) mencionan que los criterios para determinarlas como subfamilias no son suficientes y opinan que los límites familiares no son claros, por lo que consideran a la familia con una circunscripción muy

amplia y como una decisión taxonómica arbitraria (al considerar o no a Amaryllidoideae y Agapanthoideae como subfamilias). Por otra parte, en el trabajo de García-Mendoza (2021) Alliaecae y Agapanthaceae se consideran independientes de Amaryllidaceae, por lo que los cambios taxonómicos en la familia suelen ser frecuentes.

Por otro lado, las especies de esta familia también son reconocidas por su uso en la medicina tradicional, particularmente por la presencia de un grupo de metabolitos secundarios exclusivos: los alcaloides de isoquinolina, que en su mayoría no se encuentran en otras familias de plantas y además, son característicos por su valor quimiotaxonómico (Bastida et al., 2011; Katoch et al., 2012; Saliba, 2015; Berkov et al., 2020).

Dentro de las amarilidáceas se encuentra Hippeastreae, una tribu con casos de hibridación y con propuestas filogenéticas diferentes por la complicitad del grupo (García et al., 2019). A su vez, *Zephyranthes* pertenece a la tribu Hippeastreae donde se clasifican de diez a trece géneros mayormente diversos en Sudamérica y algunos en Norteamérica (México y Estados Unidos) (García et al., 2014). Este género alberga aproximadamente 70 especies que se encuentran distribuidas únicamente en el continente americano, desde Maryland (Estados Unidos) hasta Sudamérica (Argentina), de ellas al menos 37 especies son nativas de México y aproximadamente 23 de estas son endémicas (Tapia-Campos et al., 2012; Spurrier et al., 2015, CONABIO, 2022).

Por su parte, las especies del género *Zephyranthes* se han descrito como plantas herbáceas perennes que poseen bulbos tunicados globosos o subglobosos, catáfilos membráceos de color café-pardo oscuro a negruzco; presentan hojas basales lisas, erectas o reclinadas consideradas ligeramente suculentas, rara vez con papilas; escapos erectos y huecos; espata tubular inferior, fenestrada o bífida; tubo del perianto generalmente corto, subcylíndrico y recto, hipocraterimorfo e infundibuliforme, con segmentos similares, elípticos, ovados u oblanceolados (Spencer, 1973; López-Ferrari y Espejo-Serna, 2002; García-

Mendoza, 2021). Generalmente presentan una sola flor erecta o suberecta, actinomorfa o zigomorfa, sésil o pedicelada, las cuales pueden ser de color, lila, púrpura, rosa, blanco o amarillo. En el caso de los órganos sexuales de la flor, se observan 6 estambres insertos en la parte apical del tubo del perianto, con filamentos largos, erectos y anteras dorsifijas, lineares, arqueadas en la madurez; el estigma es tripartito, estilo filiforme y el ovario tiene más de un óvulo por lóculo; semillas negras, aplanadas y aladas (Spencer, 1973; López-Ferrari y Espejo-Serna, 2002; García-Mendoza, 2021).

Entre las investigaciones para las especies de este género se encuentran las realizadas con especies de mexicanas, algunas acerca de la actividad biológica de sus metabolitos secundarios (Reyes-Chilpa et al., 2011; Centeno, 2014; Centeno et al., 2021, 2022), por la tendencia a hibridación (Damián, 2010; Tapia-Campos et al., 2012; Centeno et al., 2022), estudios taxonómicos (Spurrier et al., 2015; Flagg et al., 2018) e incluso enfocados a su propagación (Soriano, 2019). Asimismo, la amplia variación morfológica y la alopoliploidía son características usuales en las especies de *Zephyranthes*, lo que ha sido en parte algunas de las causas que ha complicado la clasificación y la propuesta de filogenias en Hippeastreae (Flagg et al., 1976; García et al., 2019; García-Mendoza, 2021).

## 2. ANTECEDENTES

---

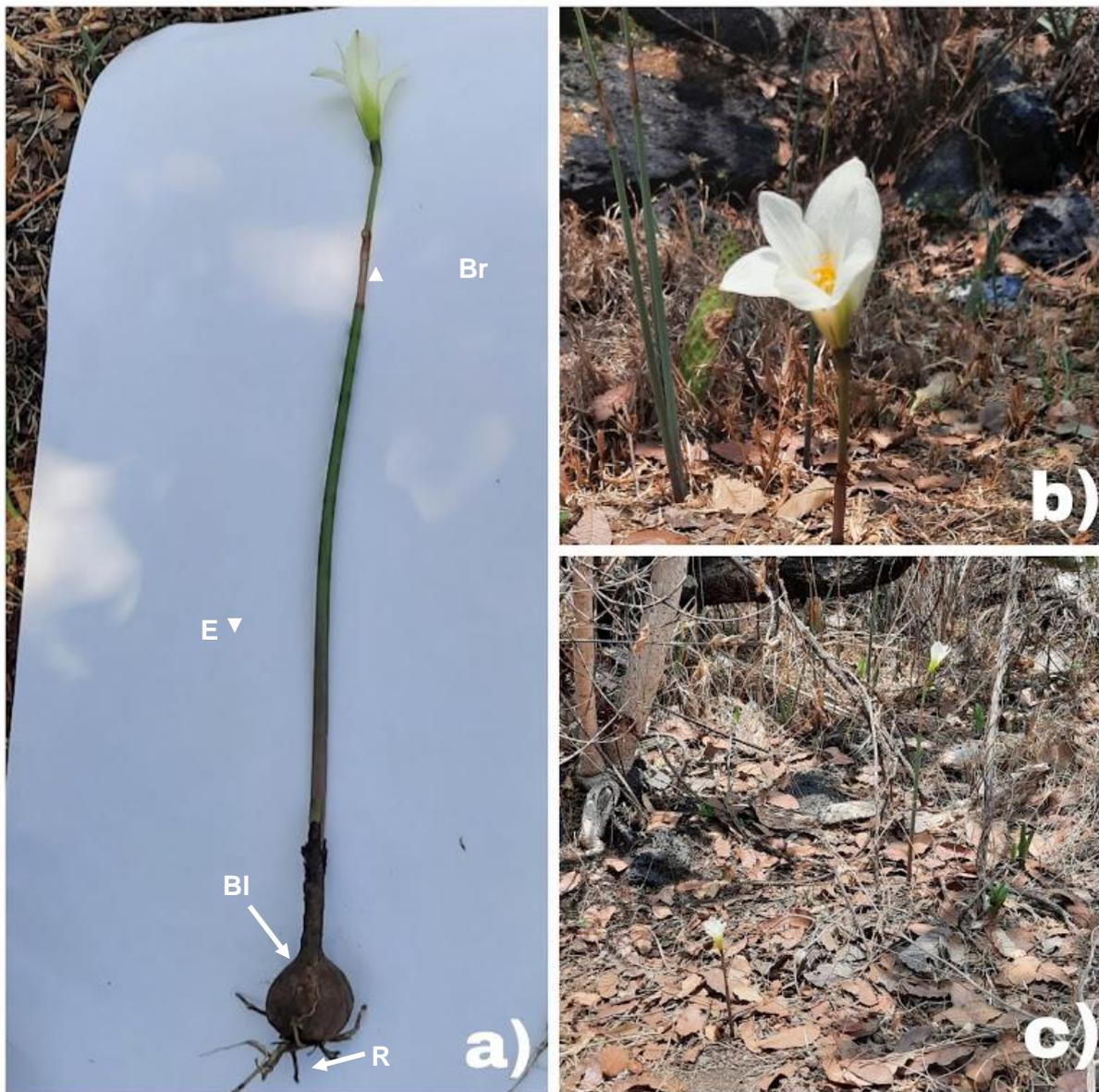
### 2.1 *Zephyranthes alba* (Amaryllidaceae)

La especie endémica de la Ciudad de México, *Z. alba* Flagg, G. Lom. Sm. y García-Mend. es característica por sus flores blancas y vistosas, por poseer alcaloides de importancia médica e incluso por estar asociada a un posible caso de hibridación con otra especie de *Zephyranthes* (Damián, 2010; Reyes-Chilpa et al., 2011; Flagg et al., 2019; Centeno et al., 2022).

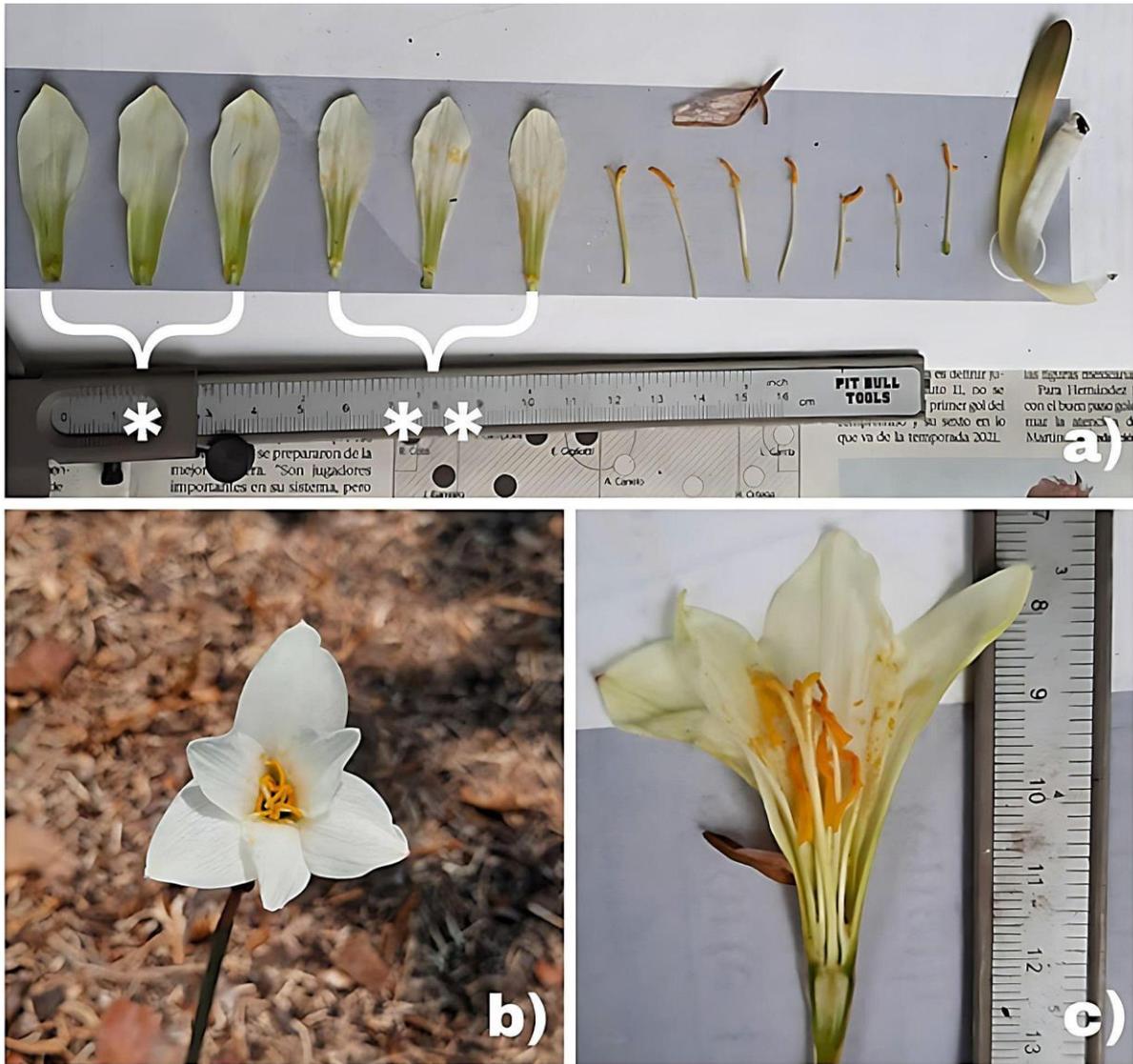
#### 2.1.1 Morfología y fenología

La diagnosis morfológica descrita a continuación para *Z. alba* (fig. 1 y fig. 2) es tomada de Flagg et al., (2019) quienes la describen como: “una planta herbácea que puede medir hasta 60 cm de alto, posee un bulbo ovoide de 4-5 cm de largo y 4-5 cm de diámetro, cuello de 4.5-9 cm de largo túnica pardo oscura; láminas foliares glaucas, 7-9 mm de ancho; en ocasiones con nervios y márgenes con pequeñas papilas dispersas; flores solitarias en forma de embudo con escapo de 20-40 cm; espata de 3.5-5.5 cm; pedicelo de 4.5-8.7 cm; perianto de 5-6.2 cm, con tubo de color verdoso-amarillento oscuro a verde mostaza; segmentos principalmente blancos por dentro y por fuera, ápices apiculadas a veces rosas, generalmente amarillo verdoso o amarillo mostaza; estambres en 2 conjuntos superpuestos en tres, anteras entremezcladas en cada conjunto; 6 anteras horizontales, recurvadas, adheridas submedialmente; filamentos más largos que el tubo de perianto; polen amarillo; estigma cerca de la parte superior de las anteras, trífido con lóbulos lineales, cápsula trilocular de 1.5-2.7 cm de largo y 1.5-2.7 cm de diámetro; semillas de 8-11 x 5-7 mm”. En cuanto a su fenología, *Z. alba* es una especie que florece de abril a junio y fructifica de mayo a julio, son conocidas popularmente como “mayitos” debido a que el mayor pico de floración se produce

principalmente durante el mes de mayo, ya que en la temporada de lluvias tempranas se estimula el crecimiento floral (Damián, 2010; Centeno, 2014; Flagg et al., 2019).



**Figura 1.** *Zephyranthes alba*. Ciudad de México, Zona Arqueológica de Cuicuilco. a) Planta completa, se observan las raíces (R), el bulbo (BI), el escapo (E), la bráctea (Br) y la flor; b) Flor completa; c) Individuos de la especie.



**Figura 2.** Estructuras florales de *Z. alba*. Ciudad de México, Zona Arqueológica de Cuicuilco. a) Disección floral: separación de tépalos externos (\*) y tépalos internos (\*\*), verticilos reproductivos, detalle de la bráctea y las hojas; b) Flor completa; c) Corte longitudinal de la flor: detalle de la dimensión y organización de los verticilos florales.

### **2.1.2 Distribución**

La especie *Z. alba* es endémica de la Ciudad de México. Esta planta crece en matorrales xerófilos, en los suelos volcánicos (característicos de los pedregales) originarios de la erupción del volcán Xitle hace aproximadamente 1670 años del Pedregal de San Ángel, que abarca las alcaldías Álvaro Obregón, Coyoacán y Tlalpan (Siebe, 2009; Flagg et al., 2019). Se ha reportado la existencia de la especie en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA), (ubicada en Ciudad Universitaria (CU), de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)), la Zona Arqueológica de Cuicuilco y el Bosque de Tlalpan (Flagg et al., 2019).

#### ***Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA)***

La REPSA es un recinto considerado de carácter urbano localizado en la cuenca hidrográfica del Valle de México, una parte está en el perímetro de Ciudad Universitaria (UNAM) con un ecosistema matorral xerófilo de palo loco (Castillo-Agüero, 2009; Lot y Camarena, 2009; Lee et al., 2013). Se divide en tres grandes zonas de amortiguamiento y fuera de esta se delimitaron las Áreas Verdes de Manejo Especial (AVMEs), que en su mayoría son los camellones que albergan especies florísticas y conservan el sustrato basáltico propios de la reserva, localizados en los circuitos dentro de la universidad (Maravilla-Romero y Cano-Santana, 2009; Lee et al., 2013; Castellanos, 2017).

La característica biodiversidad de la REPSA se debe principalmente a: *la ubicación*, converge la provincia biogeográfica neártica y neotrópica (coinciden especies originadas y adaptadas a climas fríos con especies que son originadas en climas tropicales); *la topografía*, por las diferencias en la inclinación del terreno propician la existencia de microambientes (en planicies, hoyos, grietas, pendientes), aunado al tipo de sustrato de roca volcánica resulta una estructura heterogénea para la diversidad vegetal; y *la estacionalidad contrastante*, durante la mitad del año el tiempo es seco (noviembre - mayo) mientras que la otra mitad

tiene constante lluvia (junio - octubre) (Castillo-Agüero, 2009; Lee et al., 2013; Centeno, 2014).

### ***Zona Arqueológica de Cuicuilco***

Cuicuilco es un sitio rodeado de bosques de pinos y encinos, lagunas, arroyos y en general cerca de muchos recursos naturales que eran útiles para su explotación (Ramírez, 2012). De igual manera, una parte de Cuicuilco fue cubierta por la lava proveniente de la erupción del volcán Xitle; el suelo es considerado de tipo volcánico de basaltos, andosol mólico y andesitas. El clima es templado-subhúmedo (como el del Bosque de Tlalpan), con lluvias en verano; por otro lado, Cuicuilco es un recinto que alberga especies animales y vegetales endémicas, la flora es de tipo arbórea y arbustiva; asimismo, todavía existen pinos y encinos (aunque no meramente como un ecosistema) y herbáceas (Villanueva, 1998; Pérez y Pérez, 2015).

### ***Bosque de Tlalpan (Parque Nacional Bosque Pedregal)***

El Bosque de Tlalpan fue declarado en 2011 parte de las Áreas Naturales Protegidas en la categoría de Zona Ecológica y Cultural. Se localiza en la alcaldía Tlalpan, dentro de la Ciudad de México con una superficie de 256.86 hectáreas con un clima templado-húmedo, en donde predomina el ecosistema Matorral Xerófilo, el Bosque de Pino-Encino e incluso un área de Bosque Cultivado (Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del D.F., 2009; Secretaría del Medio Ambiente, 2022). El entorno donde se encuentra esta área protegida es principalmente urbano; mientras que el sustrato basáltico donde se encuentra proviene de la explosión del volcán Xitle hace aproximadamente 2,000 años (Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del D.F., 2009; SEDEMA, 2022).

### 2.1.3 Modificaciones taxonómicas

Desde principios del siglo XIX se describió el género *Zephyranthes* y el género *Habranthus* Herbert; sin embargo, a lo largo del tiempo ha habido cambios respecto a las características que las definen y las delimitan, debido a la similitud de sus características morfológicas (principalmente en las flores) (Flagg et al., 2018). Más adelante, con la aportación de las filogenias moleculares y aún con complicaciones para la claridad de la sistemática de este grupo (tribu Hippeastreae), dichos géneros se propusieron como polifiléticos (García et al., 2019). Dentro de estos cambios taxonómicos se encuentra el caso de *Zephyranthes alba*.

Previamente *Z. alba* se encontraba incluida dentro de la circunscripción de *Zephyranthes concolor* (Lindl.) Benth. & Hook. f., por ejemplo, en la Flora fanerogámica del Valle de México (Calderón y Rzedowski, 2005). Cuando *Z. concolor* era el nombre aceptado también hubo cambios taxonómicos, ya que por un tiempo a esta especie se le reconoció como *Habranthus concolor* Lindl. (Damián-Domínguez et al., 2009). Posteriormente, con base en características morfológicas, estudios filogenéticos moleculares y variación citogenética se propuso regresar su clasificación como *Z. concolor* (previo al cambio taxonómico de *Z. alba* como especie endémica) y no como *Habranthus*, quién ahora es clasificado como un subgénero de *Zephyranthes* (Flagg et al., 2018; García et al., 2019; García-Mendoza, 2021). Cabe señalar que en trabajos anteriores a la designación de *Z. alba* (Flagg et al., 2019), los estudios realizados en el Pedregal de San Ángel eran referidos como individuos de la especie *Z. concolor* (p.e. Reyes-Chilpa et al., 2011) o *H. concolor* (p.e. Damián, 2010; Centeno, 2014).

En cuanto a las diferencias morfológicas entre *Z. alba* y *Z. concolor* (tabla 1) se encuentran la superficie de la hoja, posición de las anteras en relación con las ramas estigmáticas, longitud del perianto y color del tubo del perianto, además de diferencias fenológicas (meses de floración y fructificación) (Flagg et al., 2019). También se encontraron diferencias en su distribución, dado que *Z. concolor* tiene una distribución más amplia

(Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes y Guanajuato) (Galván, 2005; Clint, 1955, citado por Flagg et al., 2018), en tanto que *Z. alba* se ubica únicamente en la Ciudad de México (Flagg et al., 2019). Finalmente se han reportado diferencias citológicas, con base en el número de cromosomas somáticos la diploidía de *Z. concolor* es de  $2n = 22$ , mientras que en *Z. alba* el número cromosómico es de  $2n = 96$  (Flagg et al., 2019).

Por otro lado, en un estudio florístico de la REPSA, se detectaron individuos que presentaban características atípicas: flores con un tono rosa pálido, con tintes rojos y verdes en la punta exterior de los tépalos, por lo que se propuso la existencia de un probable híbrido entre *Z. alba* (antes *Z. concolor* / *H. concolor*) y *Zephyranthes fosteri* (Traub) designado como *Habranthus* aff. *concolor*. De igual manera, los caracteres vegetativos y los frutos de este taxón presentaron características de las especies propuestas como parentales (Damián, 2010).

**Tabla 1.** Diferencias morfológicas, citológicas y de distribución entre *Zephyranthes alba* y *Zephyranthes concolor* (Flagg et al., 2018; Flagg et al., 2019).

<b>Caracteres morfológicos, citológicos y distribución</b>	<b><i>Zephyranthes alba</i></b>	<b><i>Zephyranthes concolor</i></b>
Superficie de la hoja	Nervios y margen en algunas ocasiones con papilas pequeñas y dispersas	Nervios y margen sin papilas
Proporción de la hoja madura	Más ancho que el escapo, 1.3 cm más amplio	Más ancho que el escapo, 1.5 cm más amplio
Posición del estigma	A la misma altura que las anteras o hasta 5 mm más allá de las anteras	1.3–1.7 cm más allá de las anteras
Longitud del perianto	(4.2–)5–6.2 cm	5.5-7.7 cm
Color del limbo del perianto	Blanco	Blanco con tonos amarillos
Color del tubo del perianto	Amarillo oscuro-verde o mostaza-verde	Verde-amarillento o pálido
Número cromosómico	2n = 96	2n = 22
Distribución	Delimitada a la Ciudad de México	Zacatecas, Aguascalientes, Guanajuato, San Luis Potosí

## 2.2 Morfometría

La necesidad de caracterizar a los seres vivos inició con descripciones morfológicas más sencillas, “alargado”, “fusiforme”, “en forma de círculo”, entre otros (López, 2015). Dentro de los parámetros utilizados para dichas descripciones se encuentra la morfometría que es definido como un análisis cuantitativo encargado de la comparación de la forma considerando principalmente la variación y en pocas ocasiones las asociaciones de esta con factores extrínsecos y el tamaño de organismos u objetos de interés a través de la aplicación de fundamentos matemáticos (Slice 2007; Torcida y Pérez, 2012; Zelditch et al., 2012). Las técnicas morfométricas se han desarrollado con el paso del tiempo, han atravesado cambios debido a la implementación de nuevas tecnologías y la innovación en programas computacionales; lo cual ha permitido realizar análisis con diferentes enfoques y a su vez, se destaca el interés por conocer la variación morfológica de un objeto investigado (Zelditch et al., 2012; De Luna, 2020). Por lo tanto, es sumamente útil en el estudio de formas biológicas, su principal aplicación es en el área de biología comparada, como en la observación de tejidos, células y dimensiones (Toro et al., 2010).

Existe la morfometría tradicional, que se basa en medidas lineales, radios o ángulos empleada en la segunda mitad del siglo XX, así como la morfometría geométrica, basada en la obtención de la geometría de un organismo para estudios comparativos desde una perspectiva cuantitativa y con mayor auge a finales del siglo XX (Adams et al., 2004; Slice, 2007; Mitteroecker y Gunz, 2009).

### 2.2.1 Morfometría tradicional

La morfometría tradicional por su parte considera variables lineales tales como la longitud, distancias, ángulos, proporciones, altura o ancho, así como la profundidad en ciertos casos, con el fin de conocer si existen diferencias en la forma o el tamaño de algún objeto de estudio (fig. 3a) (Torcida y Pérez, 2012; López, 2015; De Luna, 2020). Dichas variables lineales se delimitan entre puntos anatómicos de interés y se analizan por medio de técnicas univariadas o multivariadas (Torcida y Pérez, 2012; Zelditch et al., 2012).

Dada la naturaleza de los métodos para medir los objetos empíricos (las mediciones se solapan o suelen irradiar de un mismo punto a direcciones similares) en la morfometría tradicional existen ciertas limitaciones, ya que los datos recopilados tienen poca información sobre la forma y tienden a la distorsión (Zelditch et al., 2012). Asimismo, las mediciones basadas en morfometría tradicional no siempre muestran las características homólogas del organismo, también puede haber influencia en la forma debido al tamaño, impidiendo la diferenciación clara entre la forma y el tamaño; así como las relaciones espaciales entre las mediciones no se recopila al momento de llevarlas a cabo y, a su vez una limitante importante es que las mediciones no contienen información acerca de la estructura geométrica del organismo (Toro et al., 2010; Zelditch et al., 2012).

En 1930 se desarrollaron análisis estadísticos más formales para variables lineales, propias de la morfometría tradicional, donde se buscaba enriquecer los métodos propios para estudios morfológicos (Toro et al., 2010). Algunos ejemplos donde la morfometría tradicional ha sido empleada son: investigaciones relacionadas con análisis genéticos, evaluación de la modularidad o el estudio de cráneos humanos y de otros primates (Klingenberg, 2013).

### 2.2.2 Morfometría geométrica

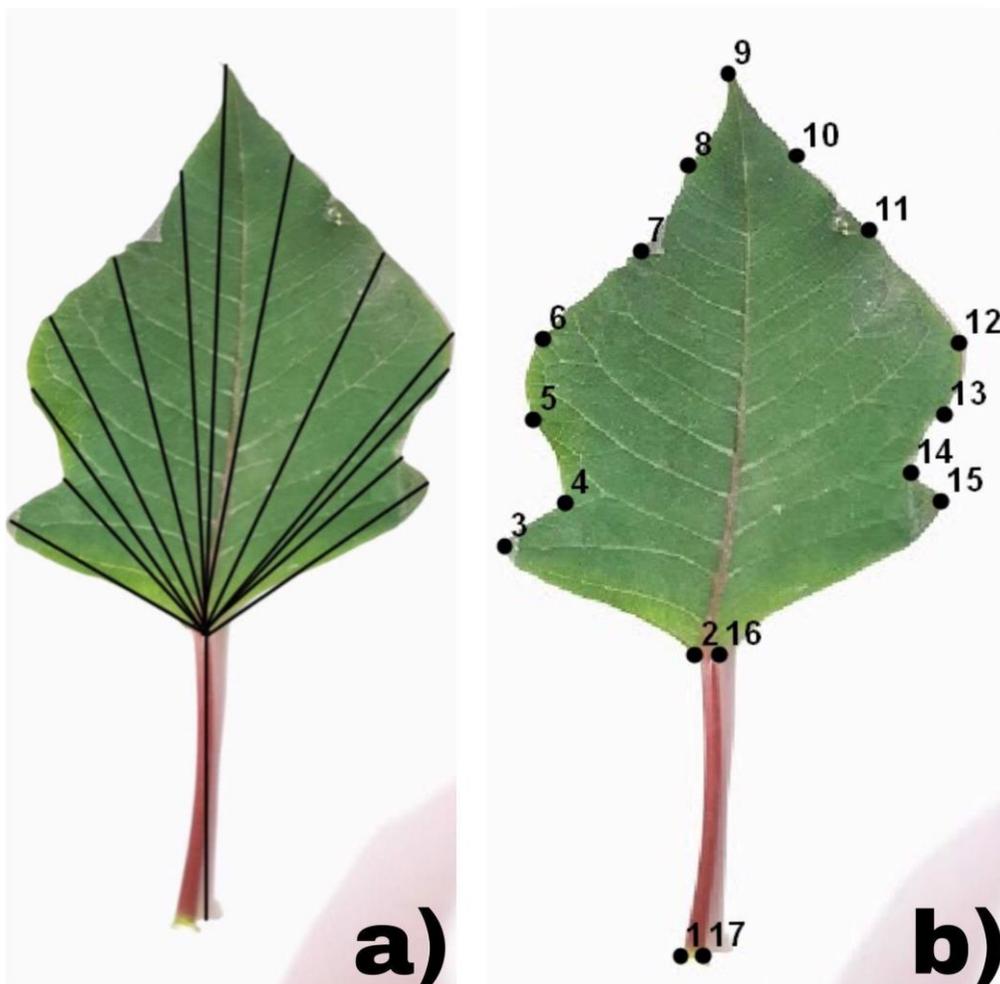
La morfometría geométrica permite hacer la comparación entre formas de interés u objetos de estudio (Slice, 2007). Entre ellos es evidente que destaca la inclinación por estudiar la forma. Mosimann y James (1979) y Bookstein (1989) señalan que con esta herramienta se puede tener un acercamiento para conocer y entender las posibles causas de la variación e incluso transformación morfológica por medio del análisis de la forma.

En morfometría geométrica la forma se estudia a través de análisis estadísticos de marcas delimitadas en el objeto empírico, a dichas marcas se les conoce como *landmarks* en inglés; las cuales son puntos de referencia que son geoméricamente homólogos entre individuos (Torcida y Pérez, 2012; Gunz y Mitteroecker, 2013). Cada marca tiene un par de coordenadas cartesianas estipuladas (x, y) para aquellos objetos de estudio con dos dimensiones (fig. 3b) e incluso, hasta tres coordenadas (x, y, z) si se consideran tres dimensiones; dichas coordenadas cartesianas albergan información (por el lugar de interés en que se colocó la marca) sobre la forma y/o el tamaño (según sea el caso), también tienen referencia acerca de la orientación y posición de estas mismas (Torcida y Pérez, 2012; De Luna, 2020).

Por otra parte, existen las semi-marcas (*semilandmarks*), las cuales son utilizadas para capturar formas (tales como curvas y superficies para dos o tres dimensiones) que no pueden ser delimitadas mediante las *landmarks* o marcas convencionales; pero en conjunto las marcas y semi-marcas pueden analizar la forma idóneamente (Gunz y Mitteroecker, 2013).

Asimismo, se conoce como configuración de marcas al número total de marcas (con sus respectivas coordenadas) que se definen para delimitar la forma del organismo u objeto empírico, la cual incluye información acerca de la forma, orientación, ubicación y el tamaño (Zelditch et al., 2012).

Un ejemplo de morfometría geométrica aplicada en plantas es el trabajo de Cuervo et al., (2012) realizado en flores de *Masdevallia coccinea* y *Masdevallia ignea* en el que las autoras consideraron variables morfológicas relacionadas con el despliegue floral, el acceso de los polinizadores, el mecanismo de polinización y el acople morfológico entre el polinizador y la flor. De igual manera el trabajo de Hernández y Falcón (2014) consistió en analizar la variedad en el contorno de las hojas de cuatro especies del género *Morella* en el que comprobó que la variación en las hojas era causada por las condiciones en las que las plantas se desarrollaban.



**Figura 3.** Comparación entre mediciones llevadas a cabo por métodos de morfometría tradicional y mediciones realizadas con base en métodos de morfometría geométrica. a) A partir de un único punto se trazan mediciones lineales a diferentes partes del organismo; b) Se colocan marcas en sitios claves de la hoja, cada una contiene un par de coordenadas para delimitar la forma de esta. Imagen ilustrativa realizada por Keren Alva.

### 3. JUSTIFICACIÓN

---

Se ha reportado que algunas especies de *Zephyranthes* presentan mucha variación y/o plasticidad fenotípica, particularmente en las flores, lo que en ocasiones puede dificultar su caracterización. Es por ello que en el presente trabajo se analizó la forma de los tépalos internos y la de los tépalos externos de *Z. alba*, para conocer si existe variación o no entre individuos con base en dicho verticilo, y así contribuir a la caracterización de esta especie endémica en el Pedregal de San Ángel.

## 4. OBJETIVOS

---

### Objetivo general

- Comparar la forma de los tépalos externos e internos de las flores de *Z. alba* de seis sitios del Pedregal de San Ángel de la Ciudad de México desde un análisis de morfometría geométrica.

### Objetivos particulares

- Obtener la forma consenso de los tépalos internos y externos de los individuos de *Z. alba* a través del análisis de Procrustes.
- Comparar por métodos estadísticos si existe o no variación en la forma de los tépalos internos y externos de *Z. alba*.
- Determinar si los tépalos internos y externos son una característica homogénea o heterogénea en los individuos estudiados.

## 5. HIPÓTESIS

---

Si las flores de *Zephyranthes* presentan frecuentemente variación o plasticidad fenotípica entre individuos o entre especies, entonces en la forma de los tépalos internos y externos de *Z. alba* analizados se encontrarán diferencias.

## 6. MATERIALES Y MÉTODOS

---

### 6.1 Muestras, montaje y agrupación de ejemplares de *Z. alba*

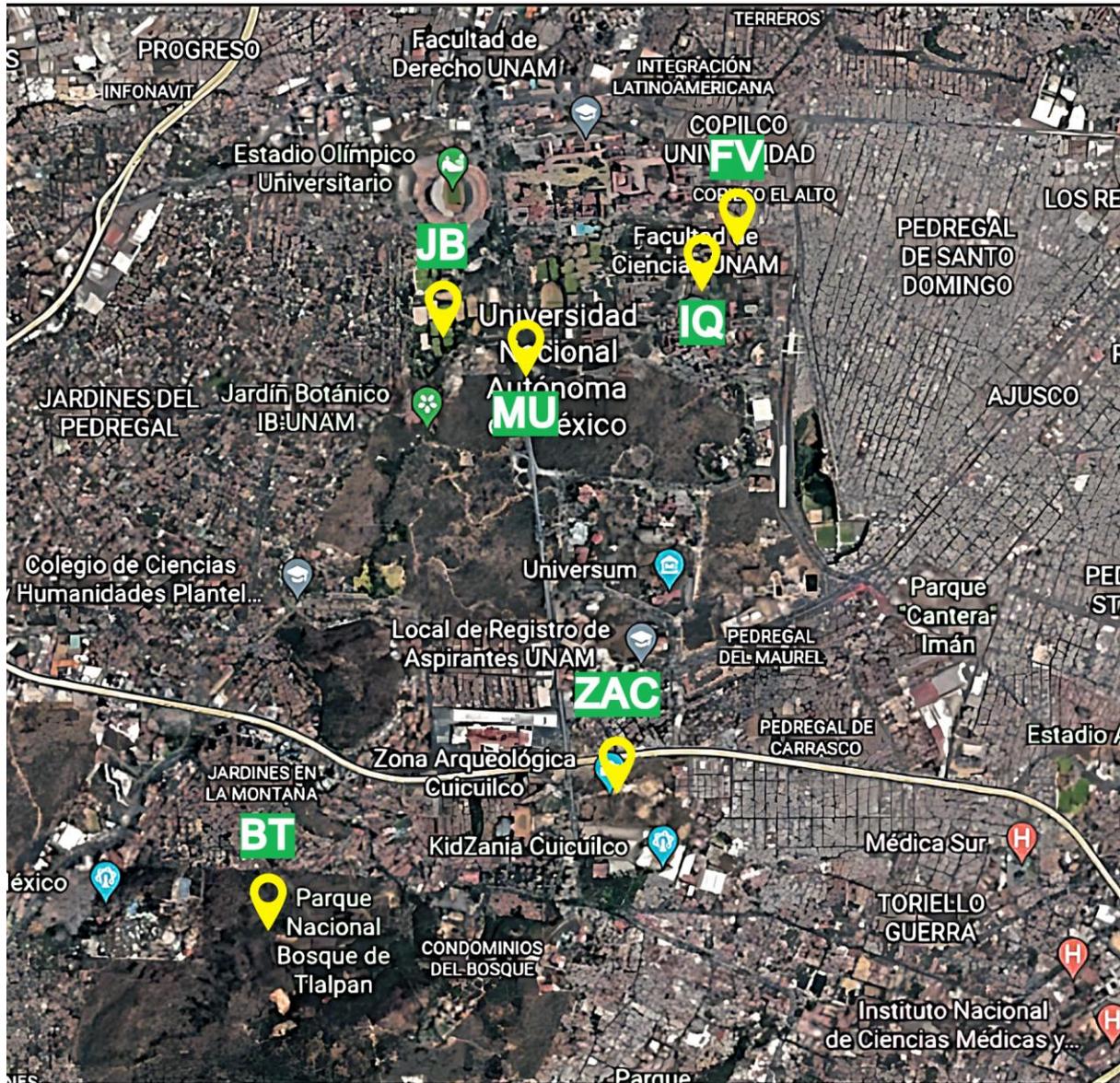
Entre los atributos que permiten considerar a un individuo como una especie se encuentran las particularidades fenotípicas (Aguilera y Silva, 1997), debido a que las características morfológicas juegan un papel importante para describir, clasificar y diferenciar individuos (Franco e Hidalgo, 2003). Tal es el caso de *Z. alba*, que fue propuesta como una nueva especie en parte por las características morfológicas que la conforman, y a su vez, que permiten diferenciarla de otras especies dentro del género que presentan morfologías similares.

Es por eso que se trabajó con 45 muestras de la especie *Z. alba*, provenientes de seis sitios de colecta (fig. 4) localizados en sitios cercanos al sur de la Ciudad de México (tabla 2), que son los siguientes: 1) Estacionamiento del Instituto de Química (fig. 5), 2) Camellón frente a la Facultad de Veterinaria, 3) Camellón frente al Metrobús Universidad (fig. 5), 4) Zona Arqueológica de Cuicuilco, 5) Cerca del Jardín Botánico (fig. 5) y 6) Bosque de Tlalpan.

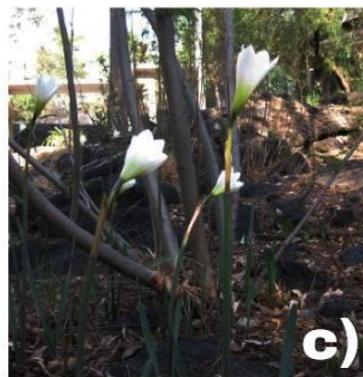
**Tabla 2.** Abreviaciones, coordenadas geográficas y altitud de los sitios de colecta de *Z. alba*.

Sitio de colecta		Abreviación	Coordenadas geográficas N-O	Altitud
#	Nombre			
1	Instituto de Química	IQ	19° 19' 33.4" N - 99° 10' 42.9" O	2,259 m
2	Facultad de Veterinaria	FV	19° 19' 41" N - 99° 10' 34" O	2,269 m
3	Metrobús Universidad	MU	19° 19' 24.3" N - 99° 12' 14.8" O	2,294 m
4	Zona Arqueológica de Cuicuilco	ZAC	19° 17' 58" N - 99° 10' 57" O	2,303 m
5	Jardín Botánico	JB	19° 20' 04" N - 99° 11' 44" O	2,311 m
6	Bosque de Tlalpan	BT	19° 17' 32" N - 99° 11' 50" O	2,391 m

Posteriormente, los verticilos florales fueron separados de cada individuo y se montaron sobre una lámina de papel, separando los tépalos externos e internos, así como los órganos sexuales de la planta (fig. 6). Una vez fijados los verticilos florales se escanearon y se digitalizaron para obtener las imágenes, agregando una escala en cada imagen (fig. 6). En total se analizaron 20 individuos (con tres tépalos internos y tres tépalos externos cada uno) para los sitios de colecta correspondientes al IQ, FV, MU y JB; excepto para el BT en el que se analizaron diez individuos y finalmente ZAC con quince individuos debido a la poca disposición de flores. Una vez finalizada la digitalización y la obtención de las imágenes, todas estas se ordenaron en dos grandes grupos: tépalos externos y tépalos internos. A partir de esta organización se llevaron a cabo los siguientes análisis.



**Figura 4.** Mapa de los seis sitios de colecta de *Z. alba* (marcas amarillas) en el Pedregal de San Ángel, Ciudad de México. Imagen satelital obtenida del servidor *Google Earth* (Consultado el 10/02/2023).



**Figura 5.** *Z. alba* en tres sitios de colecta. a) Individuos de la especie localizados cerca del JB; b) Detalle de la flor en el IQ; c) Individuos de la especie en el IQ; d) Detalle de la flor en crecimiento en MU. Fotos: Lucía Centeno.



**Figura 6.** Escaneo y digitalización de imágenes de las estructuras florales de *Z. alba*. Verticilos florales: tres tépalos externos, tres tépalos internos, seis estambres y un gineceo.

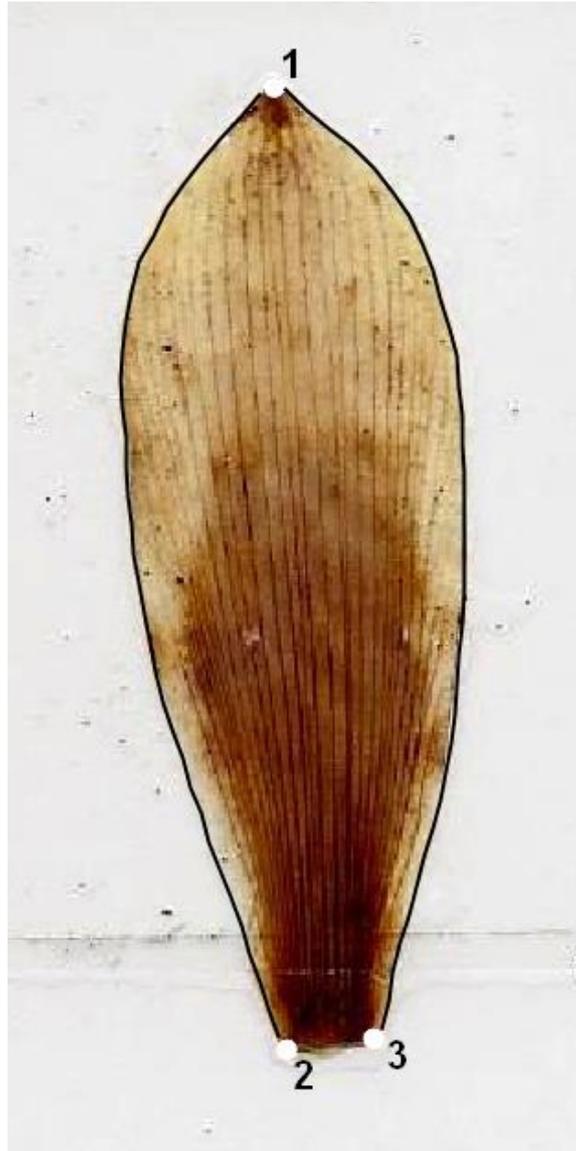
## 6.2 Análisis de morfometría geométrica

Entre las principales funciones de la morfometría geométrica se encuentra el conocer la forma y/o la comparación de esta, en seres vivos o en estructuras específicas de algún organismo en particular. En el presente trabajo se describió la forma de los tépalos externos e internos de *Z. alba* desde una perspectiva de morfometría geométrica, lo cual es útil para conocer de manera detallada si existe variación en la forma de esta característica, debido a las semejanzas morfológicas que tiene esta especie con otras *Zephyranthes*. Asimismo, si los resultados indican que tanto tépalos externos como internos no presentan mucha variación, entonces se pueden proponer como un carácter homogéneo; o bien, podrían considerarse como una característica heterogénea dado el caso de que se encuentre un alto porcentaje de variación.

Ahora bien, si en el análisis se encuentra mucha diferencia en la forma de ambos tépalos, se sabría que son un carácter heterogéneo al ser altamente variable en esta especie y no sería una característica factible para realizar comparaciones morfológicas con otras especies; se plantea como hipótesis que una de las posibles causas de esto sea por la influencia de factores ecológicos, fisiológicos e incluso evolutivos en la especie, evidentemente, para conocer esto de manera precisa sería necesario llevar a cabo un estudio pertinente adicional. Por el contrario, si los resultados indican que existen pocas o nulas diferencias en los tépalos internos y externos de *Z. alba*, se podría atribuirse en parte a que los individuos recolectados se encuentran en sitios muy próximos y crecen con condiciones ambientales similares, lo cual posiblemente señalaría una baja plasticidad fenotípica en este carácter y a su vez, si se tuviera poca o nula variabilidad en ambos tépalos, esto permitiría proponerlos como una característica homogénea útil para realizar comparaciones morfológicas con otras especies.

A partir de las imágenes escaneadas en formato JPG, estas se cambiaron a formato *tps* por medio del programa *TPSUtil ver 1.81.*, lo cual es necesario para la lectura de archivos en los programas usados de morfometría geométrica.

Posteriormente, a través del programa *TPSDig ver 2.31* se cargaron los archivos en el formato mencionado para realizar la asignación de marcas correspondiente. En principio se colocaron tres marcas en cada uno de los tépalos, la primera en el ápice y dos más en la parte basal de este (fig. 7). Después se trazaron curvas para cada tépalo, por medio de la función "*draw background curves*" en el mismo programa, esto se hizo marcando del punto 1 a 2 y de punto 1 a 3 (fig. 7), obteniendo dos curvas por tépalo. A su vez, a cada curva se asignaron 35 marcas más para alcanzar una mayor cobertura de la forma y la repetibilidad, es decir que cada marca pueda ser reconocida y repetida en todos los tépalos analizados.



**Figura 7.** Ejemplo de la digitalización de marcas y trazado de curvas en un tépalo externo en el programa TPSDig. Tres marcas (color blanco): La primera localizada en el ápice del tépalo, y las otras dos en el lado izquierdo y derecho de la base del tépalo. Asimismo, cada una de las curvas (líneas en color negro) se pusieron 35 marcas para cubrir la forma del tépalo.

### 6.2.1 Análisis Generalizado de Procrustes (GPA)

El Análisis Generalizado de Procrustes es el método de superposición más utilizado en estudios de morfometría geométrica, para excluir datos como la orientación, la localización y la escala que no son necesarios en este tipo de análisis; así como para la visualización y descripción de diferencias en las formas estudiadas, dado por las diferencias en las coordenadas de cada marca del objeto analizado (Bookstein, 1996; Adams, 2004).

Después del marcaje y trazado de curvas realizado en *TPSDig* para todos los tépalos externos y los tépalos internos de todos los sitios de colecta, se obtuvo un archivo el cual se utilizó en los análisis posteriores y las pruebas estadísticas, los cuales se realizaron en el programa *R Studio ver 1.4.1717*. El primer análisis fue el GPA con la superposición de marcas a través de la función *gpagen* del paquete *geomorph*. El GPA se realizó dos veces, la primera considerando todos los tépalos (internos y externos) de cada individuo y la segunda con la forma promedio de los tépalos por individuo. Enseguida se visualizaron los datos ajustados con la función *plotAllSpecimens*, de igual manera en el paquete *geomorph*, en este caso se hizo únicamente para el GPA por individuo.

### **6.2.2 Análisis de Componentes Principales (PCA)**

Se emplea para realizar análisis multivariados, con la finalidad de poder seleccionar y definir la información de interés de todo un conjunto de  $p$  variables, para así agruparlas en  $m$  nuevas variables independientes. Sintetiza la información, permite visualizar los datos principales por medio de una representación en un espacio de dimensión más pequeña y se pueden interpretar con mayor facilidad (González et al., 2008).

El PCA se realizó a partir de la función *gm.prcomp* del paquete *geomorph*. En principio se realizó un PCA para tépalos externos y otro para tépalos internos que incluyeron a todos los individuos de cada uno de los sitios de estudio. Para obtener los dos gráficos de PCA correspondientes para cada grupo de tépalos se utilizó la función *as.data.frame* del paquete *base*.

### **Análisis de Componentes Principales Entre Grupos (bgPCA)**

El bgPCA es un estudio discriminante alternativo al Análisis de Variables Canónicas (*Canonical Variates Analysis, CVA*), el cual sirve para examinar las diferencias entre grupos previamente definidos (por lo que es necesario realizar previamente un PCA) y a su vez, es empleado para resumir las diferencias en grupos donde el número de variables comúnmente es mayor que el tamaño de la muestra, que es muy común en los análisis de morfometría geométrica (Cardini y Polly, 2020). En este análisis se tomó en cuenta únicamente el promedio de la forma de los tépalos externos e internos por cada individuo. La función utilizada para la obtención de los bgPCA fue *gm.prcomp* del paquete *geomorph*., de igual manera se realizó un bgPCA para tépalos externos y otro para tépalos internos. De igual manera, para visualizar los bgPCA en un gráfico para ambos tépalos se empleó la función *as.data.frame* del paquete *base*.

### ***Gradillas de deformación***

Una vez obtenidos los cuatro análisis con los gráficos correspondientes, dos PCA y dos bgPCA para tépalos externos y tépalos internos, se procedió a generar las gradillas de deformación con el fin de obtener una visualización de la forma final de los tépalos analizados. En total se obtuvieron cuatro gradillas de deformación para cada PCA y bgPCA, a través de la función *plotRefToTarget* en el paquete *geomorph*. Dos gradillas corresponden a los valores del componente principal 1 (uno positivo y otro negativo) y dos al componente principal 2 también con un valor positivo y negativo.

### 6.3 ANOVA

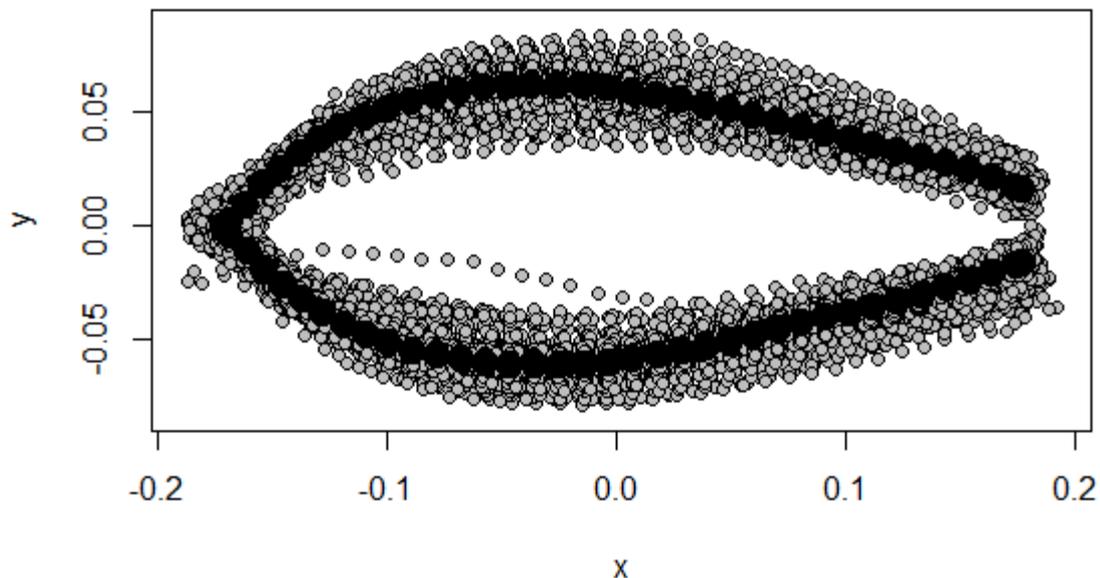
El análisis estadístico se llevó a cabo para determinar si existen o no diferencias entre los grupos analizados, para lo cual se realizaron dos pruebas de ANOVA. La primera con el conjunto de datos de todos los tépalos (externos e internos, respectivamente) con la función *procD.lm* (del paquete *geomorph*) y después con la de *summary* del paquete *base* para visualizar los datos resultantes. La segunda prueba se realizó considerando únicamente el promedio de los tépalos (externos e internos, respectivamente), también con la función *procD.lm* correspondiente al mismo paquete, *geomorph* y la función *summary* del paquete *base*.

## 7. RESULTADOS

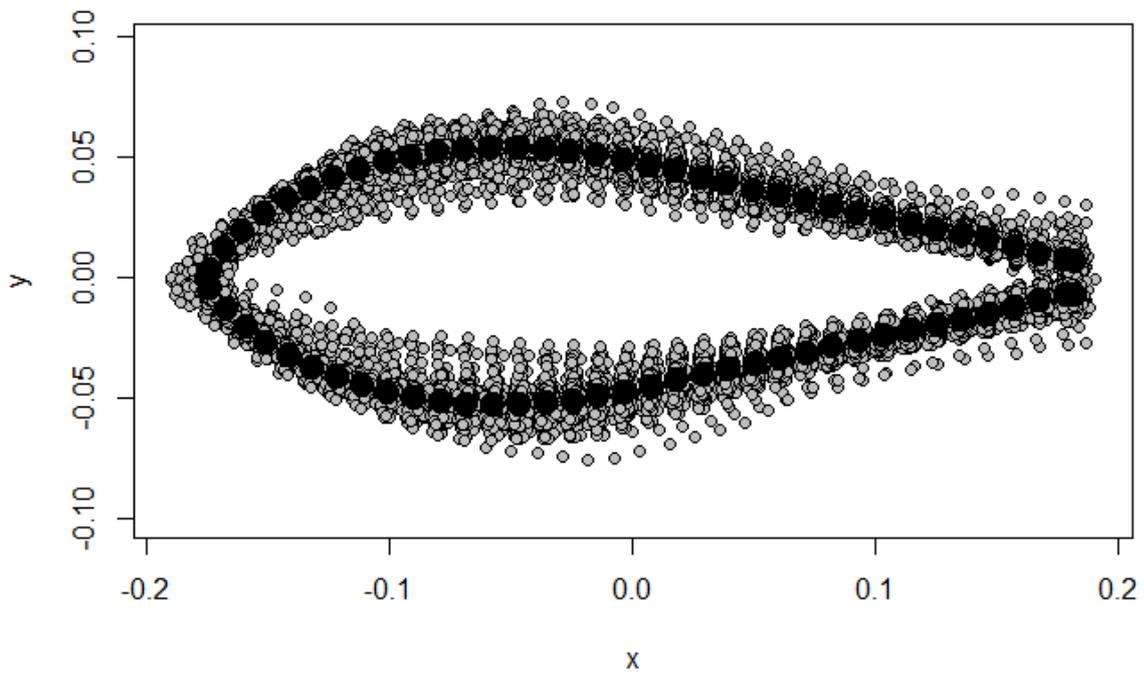
---

### 7.1 Análisis Generalizado de Procrustes (GPA)

Como primer resultado se obtuvo una forma consenso de los tépalos internos y externos de *Z. alba*. Con base en lo observado en el GPA (fig. 8 y fig. 9) la forma se describe de acuerdo con el trabajo de Radford et al., (1974) y el glosario botánico ilustrado de Moreno (1984) de esta manera: son obovados, con el ápice acuminado y la base cuneada. En el gráfico correspondiente al análisis de Procrustes realizado para los tépalos externos (fig. 8) se obtuvo la forma de un tépalo ancho según la forma promedio para éstos (resaltada con marcas / puntos negros, fig. 8) y se observa que un mayor número de individuos discrepan de la forma promedio resaltada. Por otra parte, en el gráfico obtenido del análisis de Procrustes para los tépalos internos (fig. 9) la forma promedio de estos se distingue ligeramente de los tépalos externos por ser más angostos, y en su mayoría los individuos analizados se encuentran alineados a la forma promedio.



**Figura 8.** Análisis de Procrustes de los tépalos externos. Agrupación de los individuos de los seis sitios de estudio. Marcas en color negro: define la forma promedio de los 315 tépalos analizados. Marcas en color gris: representan la forma de cada tépalo analizado.



**Figura 9.** Análisis de Procrustes de los tépalos internos. Agrupación de los seis sitios de estudio. Marcas en color negro: define la forma promedio de los 315 tépalos analizados. Marcas en color gris: representan la forma de cada tépalo analizado.

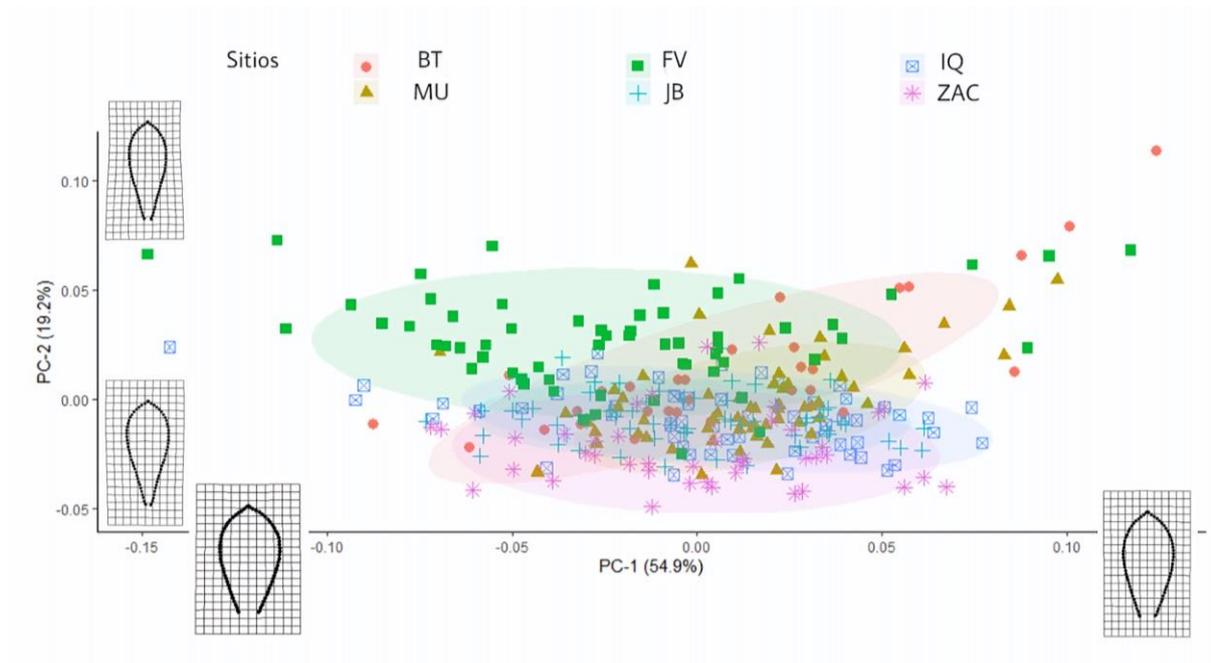
## **7.2. Análisis de Componentes Principales (PCA y bgPCA) y gradillas de deformación**

De manera general, en el gráfico obtenido del PCA correspondiente a los tépalos externos (fig. 10) se observa que todos los puntos se aglutinan hacia el centro del gráfico lo que denota que existe similitud en la forma entre los individuos analizados. Sin embargo, algunos individuos del sitio 2 (BT) y el sitio 5 (FV) se encuentran alejados del aglutinamiento, debido a que la forma de esos individuos se diferencia ligeramente del resto. En el caso del gráfico obtenido del bgPCA para tépalos externos (fig. 11), en donde pueden apreciarse aún más las diferencias en las formas, se observó de igual manera que si bien la mayoría de los individuos se encuentran agrupados en la parte central del gráfico, nuevamente individuos del sitio 2 (BT), el sitio 5 (FV) y ahora adicionalmente el sitio 6 (ZAC) presentaron una forma ligeramente distinta del resto, por lo que en el gráfico esos puntos correspondientes se separan del aglutinamiento. Asimismo, en ambos gráficos se observan algunos individuos que no forman parte de la aglomeración. De esta forma puede observarse claramente que, si bien existe una forma consenso de los tépalos externos, existen individuos que son ligeramente distintos y que además pertenecen a un grupo determinado.

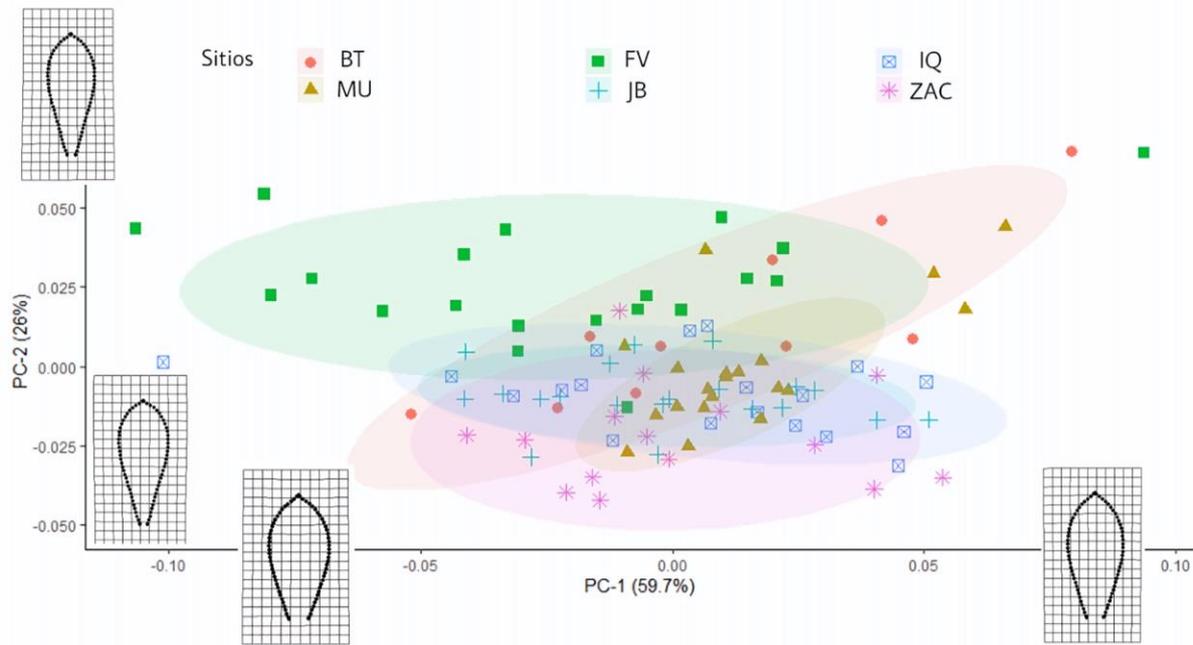
Por otra parte, en el PCA obtenido para los tépalos internos (fig. 12) todos los individuos quedaron concentrados en el centro del gráfico en su mayoría, lo que representa que existen menos diferencias en sus formas. Sin embargo, algunos individuos se observan dispersos, es decir no forman parte del sobrelapamiento, esto último es mucho más evidente que para los tépalos externos. En el caso del gráfico de bgPCA de tépalos internos (fig. 13) se observó una agrupación de individuos por sitio mayormente diferenciada en comparación con el PCA general (fig. 12); siendo el sitio FV y BT los que se diferencian más del resto.

Por su parte, en las gradillas de deformación obtenidas de los tépalos externos e internos (ubicadas alrededor de los gráficos) se encontró que presentan una forma muy similar; sin embargo, se puede observar que en general los tépalos externos son levemente

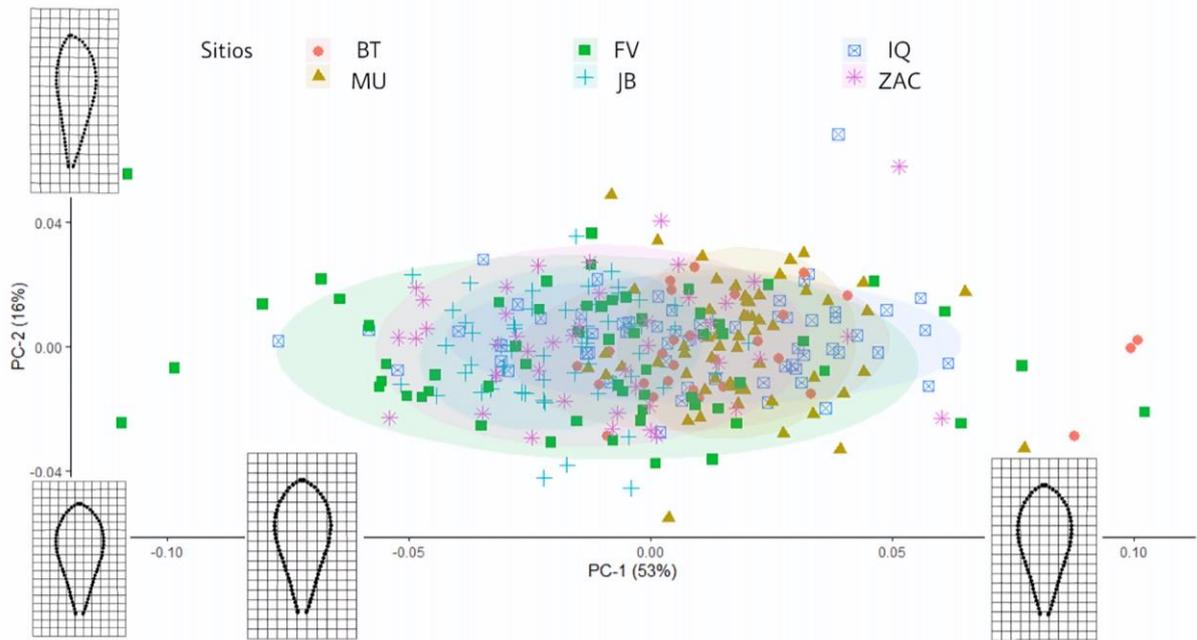
más anchos (fig. 10 y fig. 11) que los tépalos internos, los cuales son visiblemente más angostos (fig. 12 y fig. 13).



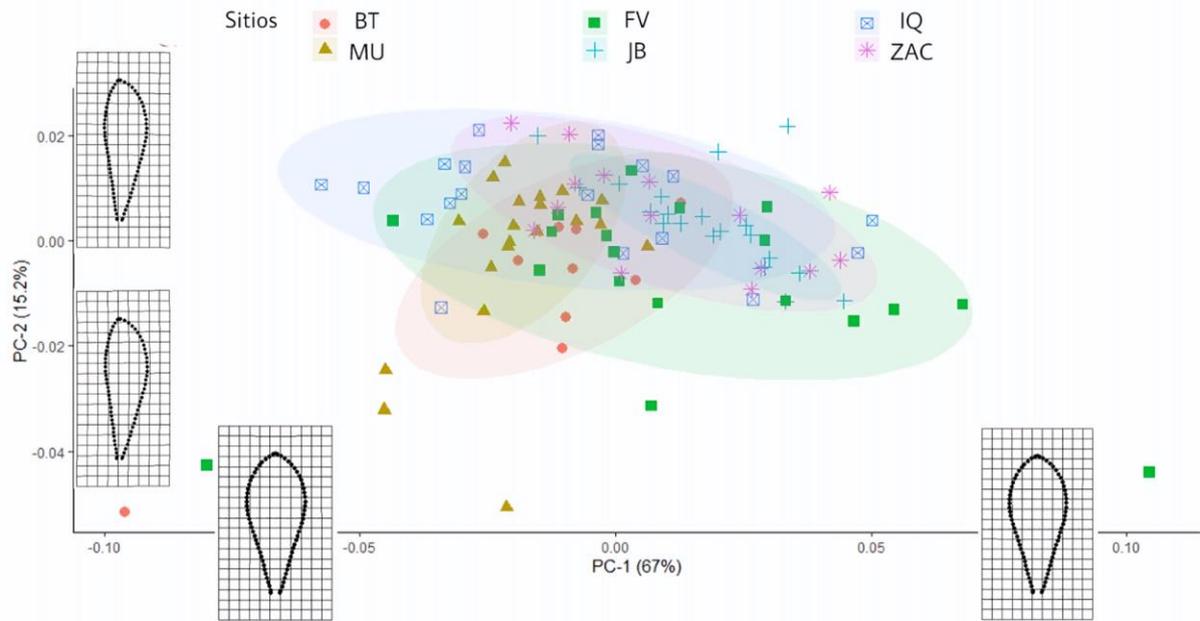
**Figura 10.** Gráfico del Análisis de Componentes Principales (PCA) de los tépalos externos. Sitio 1: IQ (Instituto de Química); Sitio 2: FV (Facultad de Veterinaria); Sitio 3: MU (Metrobús universidad); Sitio 4: ZAC (Zona Arqueológica de Cuicuilco); Sitio 5: JB (Jardín Botánico); Sitio 6: BT (Bosque de Tlalpan). Gradillas de deformación en el eje horizontal: Valor positivo máximo y negativo mínimo para el componente principal 1 (PC-1 (54.9%)). Gradillas de deformación en el eje vertical: Valor positivo máximo y negativo mínimo para el componente principal 2 (PC-2 (19.2%)). Los sitios de la FV y del BT se diferencian ligeramente del resto, los cuatro sitios restantes están anidadas al inferior del gráfico sin que su forma pueda diferenciarse entre sí.



**Figura 11.** Gráfico del Análisis de Componentes Principales Entre Grupos (bgPCA) de tépalos externos. Sitio 1: IQ; Sitio 2: FV; Sitio 3: MU; Sitio 4: ZAC; Sitio 5: JB; Sitio 6: BT. Gradillas de deformación en el eje horizontal: Valor positivo máximo y negativo mínimo para el componente principal 1 (PC-1 (59.7%)). Gradillas de deformación en el eje vertical: Valor positivo máximo y negativo mínimo para el componente principal 2 (PC-2 (26%)). Los sitios FV, BT y ZAC se separan y diferencian del resto. IQ, MU y JB, se aglutinan.



**Figura 12.** Gráfico del Análisis de Componentes Principales (PCA) de los tépalos internos. Sitio 1: IQ; Sitio 2: FV; Sitio 3: MU; Sitio 4: ZAC; Sitio 5: JB; Sitio 6: BT. Gradillas de deformación en el eje horizontal: Valor positivo máximo y negativo mínimo para el componente principal 1 (PC-1 (53%)). Gradillas de deformación en el eje vertical: Valor positivo máximo y negativo mínimo para el componente principal 2 (PC-2 (16%)). La mayoría de los individuos se encuentran anidados en el centro, y solo algunos individuos del sitio 2 se separan del resto (presentan una forma ligeramente distinta).



**Figura 13.** Gráfico del Análisis de Componentes Principales Entre Grupos (bgPCA) de tépalos internos. Sitio 1: IQ; Sitio 2: FV; Sitio 3: MU; Sitio 4: ZAC; Sitio 5: JB; Sitio 6: BT. Gradillas de deformación en el eje horizontal: Valor positivo máximo y negativo mínimo para el componente principal 1 (PC-1 (67%)). Gradillas de deformación en el eje vertical: Valor positivo máximo y negativo mínimo para el componente principal 2 (PC-2 (15.2%)). Los sitios correspondientes a la FV y al MU presentan individuos que se separan del agrupamiento general. Los individuos de los demás sitios permanecen anidados por la similitud de su forma.

### 7.3 ANOVA

Los resultados obtenidos de la prueba ANOVA individuos (tabla 3), obtenida del GPA y PCA, fue muy similar en tépalos externos y tépalos internos. El porcentaje de diferencia hallado en la forma de los tépalos externos fue de 14.08%, mientras que en los tépalos internos fue de 14.89%, es decir, solo hubo un 0.80% de diferencia entre ambos. Cabe mencionar que debido a que el valor de Pr obtenido fue de (0.001), indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre tépalos internos y tépalos externos en los individuos analizados.

Por otra parte, en la segunda prueba de ANOVA que considera el promedio de los tépalos (ANOVA promedio, tabla 3) el porcentaje de variación aumentó ligeramente para cada caso. Aquí los tépalos externos presentaron un porcentaje de variación mayor (22.23%) en los individuos analizados en comparación con la variación que presentaron los tépalos internos (21.05%), con una diferencia de 1.18% (tabla 3). A pesar de que el porcentaje de variación aumentó en ambos casos (tépalos internos y externos) el valor de Pr obtenido fue de 0.001, lo cual indica que sigue sin haber diferencias estadísticamente significativas en ningún caso.

**Tabla 3.** Resultados de la prueba estadística ANOVA de datos por individuo y ANOVA con los promedios de cada individuo para tépalos externos e internos.

Parte de la planta	ANOVA individuos		ANOVA promedio	
	Porcentaje de variación	Pr (>F)	Porcentaje de variación	Pr (>F)
<b>Tépalos externos</b>	14.08%	0.001**	22.23%	0.001 **
<b>Tépalos internos</b>	14.89%	0.001**	21.05%	0.001**

Códigos de significancia: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*'

## 8. DISCUSIÓN

---

El estudio de la forma a través de la morfometría geométrica es un método útil para conocer si existe plasticidad fenotípica entre individuos e incluso entre especies. En el presente trabajo esta herramienta se empleó para comparar de manera cuantitativa la forma de los tépalos externos e internos de individuos de *Z. alba* de manera minuciosa, y así conocer si existen diferencias en su forma con el fin de detectar si se trataba de un carácter homogéneo o heterogéneo entre los individuos analizados.

Existen algunos trabajos en donde se ha utilizado la morfometría geométrica para estudiar la forma de partes florales y su relación con el ambiente, así como el de Hernández y Falcón (2014) donde analizaron la variación del contorno de las hojas de cuatro especies del género *Morella* y encontraron que hubo una gran variación entre las hojas, lo cual fue atribuido a la variabilidad genética, a la plasticidad fenotípica e incluso a la inestabilidad en el desarrollo en esas especies de *Morella*. En cuanto a este estudio, una de las razones por las que se decidió analizar los tépalos que conforman la flor de *Z. alba* fue debido a que en investigaciones previas se reportó que las flores de algunas *Zephyranthes* suelen presentar una alta plasticidad fenotípica. Sin embargo, los resultados obtenidos en este trabajo indicaron que no existe un porcentaje de variación alto en los tépalos externos y los tépalos internos de *Z. alba*. En principio, esto concuerda en cierta parte con lo reportado por Centeno et al., (2022), ya que en un estudio morfométrico tradicional realizado en poblaciones de *Z. fosteri* (del estado de Morelos e Hidalgo) y poblaciones de *Z. alba* (del Pedregal de San Ángel, Ciudad de México), se encontró que las flores de *Z. fosteri* presentaron mayor plasticidad fenotípica y genética entre los sitios de distribución analizados en comparación con los individuos de *Z. alba*; esta última sí presentó variación floral aunque en menor medida, lo cual coincide con el bajo porcentaje de variación encontrado en los tépalos externos e internos de la especie.

Ahora bien, aunque la variación o plasticidad fenotípica en los tépalos internos y tépalos externos de *Z. alba* es poca, es evidente que existe y en parte puede ser apreciada en los gráficos de PCA. En el PCA de tépalos internos (fig. 12) se observa que hay algunos individuos (principalmente del sitio FV) que se encuentran dispersos en el gráfico, es decir, fuera del solapamiento de los demás. De igual manera, en el PCA y bgPCA de los tépalos externos (fig. 10 y fig. 11) se puede observar que algunos individuos de ciertos sitios, en específico de la FV o el BT, se encuentran alejados del resto de los individuos aglutinados, denotando con ello las diferencias que presentan en la forma. Esta diferencia en la forma presentada específicamente por individuos del sitio de FV, podría estar asociado a que se encuentran en una zona de probable hibridación entre *Z. alba* y *Z. fosteri*, (*H. aff. concolor*) reportada previamente (Damián, 2010; Centeno, 2014) en la que podrían existir individuos con morfología atípica. Finalmente, esta variación también es observable con el porcentaje obtenido de la prueba de ANOVA para tépalos internos y externos (tabla 3).

Asimismo, cabe mencionar que la variación resultante también puede explicarse por la influencia de factores abióticos (como estrés hídrico, posición geográfica o la deficiencia de minerales), y factores bióticos (edad de la planta o la heterogeneidad ambiental y ecológica), ya que se ha reportado que esto suele contribuir en las diferentes maneras de expresión de caracteres morfológicos e incluso en características citológicas (Fialová et al., 2014; Centeno et al., 2022). Para este estudio, se puede considerar que si bien los sitios donde crece *Z. alba* (REPSA, ZAC y BT) comparten algunas características bióticas y abióticas, también existe una variedad de microambientes, estacionalidad contrastante (seco-húmedo) e incluso diferentes ecosistemas, ya que incluso en uno de los sitios (BT) convergen el matorral xerófilo, bosque de pino-encino y bosque cultivado, que pudieron haber sido la causa del limitado porcentaje de variación resultante de la prueba estadística (Villanueva, 1998; Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del D.F., 2009 Ramírez, 2012; Lee et al., 2013; Centeno, 2014 y SEDEMA, 2022).

Por otra parte, si se hubiera encontrado un porcentaje de variación más alto en los tépalos internos y externos de *Z. alba* entre estos sitios de distribución, como en el caso de *Z. fosteri* (Centeno et al., 2022) no se descarta que una de las causas de dicha variación podría deberse a fuerzas evolutivas. Por lo que es importante reiterar que, en ese sentido, algunas especies de *Zephyranthes* suelen presentar mucha variación morfológica, cromosómica y molecular. La cual puede deberse a una evolución reticulada, así como a fenómenos de hibridación y alopoliploidía (García et al., 2019).

Es importante considerar que, si bien se observó que existe una ligera variación en los tépalos internos y externos analizados, estadísticamente no se encontraron diferencias en estos. Es por eso que al tomar en cuenta lo anterior, tanto tépalos externos como internos, son considerados como un carácter homogéneo en *Z. alba* al menos en los individuos analizados en este trabajo. Dicha homogeneidad podría explicarse en parte porque todos los individuos considerados en este estudio crecen en una misma región, es decir, el Pedregal de San Ángel, un lugar que presenta particularidades ecológicas y de nicho que podrían estar manteniendo la homogeneidad hallada en los tépalos internos y externos examinados, en este caso se asume que la plasticidad fenotípica no está produciendo cambios morfológicos exorbitantes en ambos tépalos, pero tampoco podría ser descartada como el agente causante del porcentaje de variación obtenido. Esto concuerda con lo que mencionan Palacio-López y Rodríguez-López (2007) en un estudio de la plasticidad fenotípica de *Lippia alba*, donde encontraron que de manera cualitativa, la población que crece en un ambiente más homogéneo presentó menor magnitud de plasticidad fenotípica en comparación con la que crece en un ambiente más heterogéneo. A su vez, esto se puede contrastar con lo encontrado en el trabajo de Velasco (2017), debido a que el autor encontró en un estudio de variabilidad genética de *Sprekelia formosissima*, que fue contrastado con *Z. fosteri* al tomarlo como marcador debido a la similitud morfológica entre los géneros, que la modificación de ciertos rasgos fenotípicos fue atribuida a la plasticidad fenotípica en respuesta al ambiente heterogéneo en donde crece *S. formosissima*. Por lo tanto, si se considera que las

condiciones ambientales son homogéneas, lo esperado es que la plasticidad fenotípica no propicie cambios significativos en las características morfológicas, y así se encontrarían pocas o nulas diferencias al estudiar los rasgos fenotípicos de una especie. En cuanto a *Z. alba*, algunas de las características ecológicas similares de las zonas donde esta crece destaca la acidez del sustrato, debido a la naturaleza de las rocas volcánicas de la región, así como el clima (templado-húmedo) y las altitudes similares (tabla 2), lo cual, en conjunto, favorece el crecimiento, el desarrollo y la homogeneidad de los tépalos internos y externos de la especie (Villanueva, 1998; Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del D.F., 2009; Siebe, 2009; Castellanos et al., 2017; SEDEMA, 2022).

Las perspectivas de este trabajo parten tomando en cuenta que una de las características que se consideraron para la delimitación de *Z. alba* fue la citología (Flagg et al., 2019), aún con esto se sugiere llevar a cabo un análisis genético y molecular más a fondo para tener un esquema completo de la biología de la especie. Asimismo, se menciona la falta de un estudio ecológico detallado de *Z. alba* que permita conocer qué tanto influyen (afectando o beneficiando) las características bióticas y abióticas en las que crece esta especie. Por otra parte, resultaría importante compararla con la especie *Z. concolor*, quien tiene mayor rango de distribución en la República Mexicana para diferenciar mejor a las especies y contribuir a su caracterización morfológica, citogenética e incluso genética.

Por todo lo anterior se considera que, si bien el análisis morfométrico geométrico realizado para los tépalos de *Z. alba* aporta información morfométrica de la especie y contribuye de algún modo con los estudios previos para la caracterización y clasificación taxonómica de la especie (Flagg et al., 2019), sería importante analizar el resto de los verticilos que conforman la flor para determinar si tomando en cuenta los caracteres florales en conjunto, se mantiene la homogeneidad resultante como al analizar los tépalos internos y externos de la especie. Por su parte, la morfometría geométrica se considera sumamente útil en casos donde se busque conocer la forma biológica de manera minuciosa, como en el

estudio de ciertas características morfológicas que pueden ser muy similares entre individuos y sea complicado diferenciarlas con las técnicas tradicionales empleadas. Así como los autores Christodoulou et al., (2020) mencionan, es de suma importancia tomar en cuenta caracteres morfológicos para la clasificación e identificación de especies (con particular interés en la botánica); esto a través de las utilidades que brinda la morfometría geométrica y de igual manera, acompañadas de métodos estadísticos cada vez más actualizados.

## 9. CONCLUSIONES

---

- En el presente trabajo se obtuvo la forma de los tépalos internos y los tépalos externos de *Z. alba* desde una perspectiva de morfometría geométrica.
- De acuerdo con los resultados estadísticos se encontró que no existe variación tanto en los tépalos externos como en los internos de los individuos analizados.
- Los tépalos externos y los tépalos internos examinados pueden considerarse como una característica homogénea en los individuos de *Z. alba*.
- La morfometría geométrica es una herramienta que puede ser muy útil en casos donde se busque conocer o comparar las formas biológicas de manera minuciosa.
- Es importante analizar el resto de los verticilos que conforman la flor para determinar si tomando en cuenta todos los caracteres en conjunto se mantiene dicha homogeneidad encontrada en este estudio.

## 10. REFERENCIAS

---

- Acton, Q. A. (2012). *Cholinesterases-Advances in Research and Application*. ScholarlyEditions. Atlanta, Georgia. 141-142.
- Adams, D.C., Rohlf, F. J. y Slice, D. E. (2004). Geometric morphometrics: ten years of progress following the 'revolution'. *Italian Journal of Zoology*, 71:5-16.
- Aguilera, M. y Silva, J. (1997). Especies y Biodiversidad. *Interciencia*, 22(6): 299-306.
- APG III. (2009). An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 161(2): 105-121.
- Bastida, J., Berkov, S., Torras, L., Pigni, N. B., De Andrade, J. P., Martínez, V., Codina, C. y Viladomat, F. (2011). Chemical and biological aspects of Amaryllidaceae alkaloids. *Transworld Research Network*. 37/661 (2) 65-100.
- Berkov, S., Osorio, E., Viladomat, F., Bastida, J. (2020). Chemodiversity, chemotaxonomy and chemoecology of Amaryllidaceae alkaloids. *The Alkaloids. Chemistry and biology*. 83, 113.
- Bookstein F. L. (1989). "Size and shape": a comment on semantic. *Systematic Zoology* 38:173-180.
- Bookstein F. L. (1996). Biometrics, biomathematics and the morphometric synthesis. *Bulletin of Mathematical Biology*, 58:313-365.
- Calderón, G. y Rzedowski, J. (2005). *Flora fanerogámica del Valle de México*. 2a. ed. Instituto de Ecología, A. C. y la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Pátzcuaro, Michoacán. 1258.
- Cardini, A., y Polly, P. D. (2020). Cross-validated Between Group PCA Scatterplots: A Solution to Spurious Group Separation? *Evolutionary Biology*, 47(1), 85–95.

- Castellanos, I., García, N. E., y Cano, Z. (2017). Procesos físicos del suelo en la reserva ecológica del Pedregal de San Ángel de Ciudad Universitaria: atributos para su conservación. *Revista Terra Latinoamericana*, 35(1), 51.
- Castillo-Argüero, S., Martínez-Orea, Y., Meave, J. A., Hernández-Apolinar, M., Núñez-Castillo, O., Santibañez-Andrade, G. y Guadarrama-Chávez, P. (2009). Flora: susceptibilidad de la comunidad a la invasión de malezas nativas y exóticas. En A. Lot y Z. Cano-Santana (Eds.), Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel. Ciudad de México. 107–133.
- Centeno, L. Y. (2014). Estudio Anatómico, Químico y Actividad Biológica de *Zephyranthes fosteri*, *Habranthus concolor* y *Habranthus aff. concolor*. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. TESIUNAM. <http://132.248.9.195/ptd2014/febrero/0709070/Index.html>
- Centeno-Betanzos, L. Y., Reyes-Chilpa, R., Pigni, N. B., Jankowski, C. K., Torras-Claveria, L., y Bastida, J. (2021). Plants of the 'Libellus de Medicinalibus Indorum Herbis' from Mexico, 1552. *Zephyranthes fosteri* (Amaryllidaceae) Alkaloids. *Chemistry and Biodiversity*, 18(3).
- Centeno-Betanzos L. Y., López-Caamal, A., Cortés-Rendón, N., León-Santiago, M., Osorio-Durango, E., Bastida-Armengol, J., Cano-Santana, Z., Reyes-Chilpa, R., y Tovar-Sánchez, E. (2022). Microsatellites, Morphological, and Alkaloids Characterization of *Zephyranthes fosteri* and *Z. alba* (Amaryllidaceae): Allopatric Populations. *Biochemical systematics and ecology*, 101, 104398.
- Chase, M. W., Reveal J. L. y Fay. M. F. (2009). A subfamilial classification for the expanded asparagalean families Amaryllidaceae, Asparagaceae and Xanthorrhoeaceae. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 161(2): 132-136.
- Christodoulou, M. D., Clark, J. Y., y Culham, A. (2020). The Cinderella discipline: Morphometrics and their use in botanical classification. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 194(4), 385–396.

- Chitwood, D. H., Klein, L. L., O'Hanlon, R., Chacko, S., Greg, M., Kitchen, C., Miller, A. J., y Londo, J. P. (2015). Latent developmental and evolutionary shapes embedded within the grapevine leaf. *New Phytologist*, 210(1), 343–355.
- Clint, M. (1955). Re-discovery of *Zephyranthes concolor*. *Pl. Life (Stanford)* 11: 43–47.
- CONABIO. (2022). Catálogo de autoridades taxonómicas con distribución en México. Publicación en Enciclovida. Consultado el 05 de octubre de 2022. [https://enciclovida.mx/busquedas/resultados?utf8=%E2%9C%93&nombre=Pastos,+palmeras+y+parientes+\(monocotiledoneas\)&nivel==&cat=7000&busqueda=avanzada&id=135324&dist%5B%5D=3&por\\_pagina=50&commit=](https://enciclovida.mx/busquedas/resultados?utf8=%E2%9C%93&nombre=Pastos,+palmeras+y+parientes+(monocotiledoneas)&nivel==&cat=7000&busqueda=avanzada&id=135324&dist%5B%5D=3&por_pagina=50&commit=)
- Corruccini R. S. (1987). Shapes in morphometrics: comparative analyses. *American Journal of Physical Anthropology*, 73:289-303.
- Cuervo, M. A. Bonilla, M. A. Bustos, R. (2012). Morfología y Morfometría De Dos Especies De Banderitas (Orchidaceae: *Masdevallia*) En Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, 17, 575–588.
- Damián-Domínguez, M., Cano-Santana, Z. y Castellanos-Vargas, I. (2009). Fenología reproductiva de *Habranthus concolor* y *H. aff. concolor* (Amaryllidaceae) y su relación con la lluvia. En: Lot, A. y Cano-Santana, Z. Eds. *Biodiversidad del Ecosistema del Pedregal de San Ángel*. Coordinación de la Investigación Científica y Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. Ciudad de México. 319-328.
- Damián, M. de J. (2010). Fenología Reproductiva de *Habranthus concolor* y *Habranthus aff. concolor* en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Angel, D.F. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- De Luna, E. (2020). Integrando análisis morfométricos y filogenéticos: de la sistemática fenética a la morfometría filogenética. *Acta Botanica Mexicana*, 2020 (127), 1–50.
- Fialová, M., Jandová, M., Ohryzek, J., y Duchoslav, M. (2014). Biology of the polyploid geophyte *Allium oleraceum* (Amaryllidaceae): Variation in size, sexual and asexual reproduction and germination within and between tetra-, penta- and hexaploid

- cytotypes. *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 209, 312-324.
- Flagg, R. O. y Flory, W. S. (1976). Origins of three Texas species of *Zephyranthes*. *Plant Life*, 32: 67–80.
- Flagg, R. O., Smith, G. L., y García-Mendoza, A. J. (2018). *Zephyranthes pseudoconcolor* (Amaryllidaceae: Amaryllidoideae), a new species from Mexico, and clarification of *Z. concolor*. *Novon*, 26(3), 290–297.
- Flagg, R. O., Smith, G. L. y García-Mendoza, A. J. (2019). Two New White-flowered Mexican *Zephyranthes* Species (Amaryllidaceae: Amaryllidoideae) with Different Breeding Systems. *Novon: A journal for Botanical Nomenclature*. 27(4): 222-230.
- Franco, T. L. e Hidalgo, R. (2003). *Análisis estadístico de Datos de Caracterización Morfológica de Recursos Fitogenéticos*. Boletín técnico no. 8. Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos (IPGRI). Cali, Colombia. 5.
- Galván, R. (2005). Amaryllidaceae. En Calderón, G. y Rzedowski, J. (Eds.). *Flora fanerogámica del Valle de México*. 2a. ed. Instituto de Ecología, A. C. y la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Pátzcuaro, Michoacán. 1258.
- García, N., Meerow, A. W., Soltis D. E. y Soltis. P. S. (2014). Testing deep reticulate evolution in Amaryllidaceae Tribe Hippeastreae (Asparagales) with ITS and chloroplast sequence data. *Systematic Botany* 39(1): 75-89.
- García, N., Meerow, A. W., Arroyo-Leuenberger S., Oliveira R. S., Dutilh J. H., Soltis P. S. y Judd W. S. (2019). Generic classification of Amaryllidaceae tribe Hippeastreae. *Taxon* 68(3): 481-49.
- García-Mendoza, A. J. (2021). Amaryllidaceae. En *Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán*. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México. Departamento de Botánica. Ciudad de México, México. 2-4, 20 y 21.

- González, Á. L., Solano, H. L., y Tilano, J. (2008). Análisis multivariado aplicando componentes principales al caso de los desplazados. *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo*, 23(23), 119-142–142.
- Gunz, P., y Mitteroecker, P. (2013). Semilandmarks: A method for quantifying curves and surfaces. *Hystrix*, 24(1).
- Hernández, M. y Falcón, B. (2014). Variabilidad inter e intra específica en la morfología foliar de las especies cubanas de *Morella* (*Myricaceae*). *Biológicas*, 16(1), 43–52.
- Judd, W. S., Campbell, C. S., Kellogg, E. A., Stevens P.F. y Donoghue. M.J. (2016). *Plant systematics: a phylogenetic approach*. 4a. ed. Massachusetts: Sinauer Associates Inc. 285-286.
- Katoch, D., Kumar, S., Kumar, N., y Singh, B. (2012). Simultaneous quantification of Amaryllidaceae alkaloids from *Zephyranthes grandiflora* by UPLC-DAD/ESI-MS/MS. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 71, 187–192.
- Klingenberg, C. P. (2013). Cranial integration and modularity: Insights into evolution and development from morphometric data. *Hystrix*, 24(1).
- Lee, W., Cram, S., González A. R. y Pérez, H. M. (2013). Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. Consultado el 17 de abril de 2021. <http://www.repsa.unam.mx/>
- López, A. (2015). Morfometría geométrica: el estudio de la forma y su aplicación en biología. *Temas de Ciencia y Tecnología*, 19(55), 53–59.
- López-Ferrari, A. R. y Espejo-Serna, A. (2002). Amaryllidaceae. En: Sosa, V. (ed.) Flora de Veracruz. Fascículo 128. Instituto de Ecología. Xalapa, Veracruz, México.
- Lot, A. y Camarena, P. (2009). El Pedregal de San Ángel de la Ciudad de México: reserva ecológica urbana de la Universidad Nacional. En Lot, A. y Cano-Santana, Z. (Eds.), *Biodiversidad del Ecosistema del Pedregal de San Ángel*. Coordinación de la

- Investigación Científica y Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. Ciudad de México. 19-25.
- Maravilla-Romero, M. C. y Cano-Santana, Z. (2009). Riqueza florística, estado de conservación y densidad de eucaliptos en cinco zonas de amortiguamiento y un área natural no protegida de Ciudad Universitaria. En Lot, A. y Cano-Santana, Z. Eds. *Biodiversidad del Ecosistema del Pedregal de San Ángel*. Coordinación de la Investigación Científica y Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. Ciudad de México. 509-521.
- Mendoza, N. (2008). *Farmacología médica*. México. Médica Panamericana: UNAM, Facultad de Medicina. 227.
- Mitteroecker P, Gunz P. (2009). Advances in geometric morphometrics. *Evolutionary Biology*, 36:235-247.
- Morelli, F., Benedetti, Y., Ibáñez-Álamo, J. D., Jokimäki, J., Mänd, R., Tryjanowski, P., y Møller, A. P. (2016). Evidence of evolutionary homogenization of bird communities in urban environments across Europe. *Global Ecology and Biogeography*, 25(11), 1284–1293.
- Moreno, N. P. (1984). *Glosario Botánico Ilustrado*. Instituto Nacional de Investigaciones Sobre Recursos Bióticos. Xalapa. 178, 188, 194, 195.
- Palacio-López, K., y Rodríguez-López, N. (2007). Plasticidad fenotípica en *Lippia alba* (Verbenaceae) en respuesta a la disponibilidad hídrica en dos ambientes lumínicos. *Acta Biologica Colombiana*, 12, 187–198.
- Pérez, A. y Pérez, E. (2015). La complejidad del manejo de zonas de turismo (eco) arqueológico en ciudades. El caso de Cuicuilco, México. *PASOS Revista de Turismo y Patrimonio Cultural*, 13(5), 1079–1094.
- Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del D.F. (2009). Estudio sobre la superficie ocupada en áreas naturales protegidas del Distrito Federal. Consultado el 27 de abril de 2022. <http://centro.paot.org.mx/documentos/paot/estudios/EOT-03-2009.pdf>

- Radford, A. E., Dickison, W. C., Massey, J. R. y Bell, C. R. (1974). *Vascular Plant Systematics*. HarperCollins. New York. 134-135.
- Ramírez, F. (2012). La erupción del Xitle y el fin de Cuicuilco. *Revista de Arqueología Americana*, 30, 61–89.
- Reyes-Chilpa, R., Berkov, S., Hernández-Ortega, S., Jankowski, C. K., Arsenau, S., Clotet-Codina, I., Esté, J. A., Codina, C., Viladomat, F. y Bastida, J. (2011) Acetylcholinesterase-inhibiting Alkaloids from *Zephyranthes concolor*. *Molecules*. 16, 9520-9533.
- Saliba, S. (2015). Nouvelles approches biotechnologiques pour l'obtention d'alcaloïdes : culture *in vitro* de *Leucojum aestivum* L. et isolement d'endophytes bactériens d'Amaryllidaceae. Tesis de doctorado. Université de Lorraine. <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01751802/document>
- Siebe, C. (2009). El Pedregal de San Ángel de la Ciudad de México: reserva ecológica urbana de la Universidad Nacional. En Lot, A. y Cano-Santana, Z. (Eds.), *Biodiversidad del Ecosistema del Pedregal de San Ángel*. Coordinación de la Investigación Científica y Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. Ciudad de México. 43.
- Soriano, A. B. (2019). Propagación y perfil fitoquímico de *Habranthus concolor* Lindl. (Amaryllidaceae). [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma de México. TESIUNAM. <http://132.248.9.195/ptd2019/mayo/0788214/Index.html>
- Slice, D. E. (2007). Geometric morphometrics. *Annual Review of Anthropology*, 36, 261–281.
- Secretaría del Medio Ambiente. (s.f.). Bosques de Tlalpan: zona ecológica y cultural. Consultado el 24 de abril de 2022. <http://www.sadsma.cdmx.gob.mx:9000/rally/pex/assets/pages/sitios/bosqueT.php>
- Spencer, L. B. (1973). *A monograph of the genus Zephyranthes (Amaryllidaceae) in North and Central America*. Tesis de doctorado. Wake Forest University. Winston-Salem, North Carolina. 81.

- Spurrier, M. A., Smith, G. L., Flagg, R. O. y Espejo-Serna, A. (2015). A New Species of *Zephyranthes* (Amaryllidaceae) from Mexico. *A journal for Botanical Nomenclature*. 24: 289-295.
- Tapia-Campos, E., Rodriguez-Dominguez, J. M., Revuelta-Arreola, M., Van, J. M. y Barba-González, R. (2012). Mexican Geophytes II. The Genera *Hymenocallis*, *Sprekelia* and *Zephyranthes*. *Floriculture and Ornamental Biotechnology*. Global Science Books. 129-139.
- Torcida, S. y Pérez, S. I. (2012). Análisis de Procrustes y el estudio de la variación morfológica. *Revista Argentina de Antropología Biológica*, 14(1), 131–141.
- Toro, M. V., Manriquez, G. y Suazo, I. (2010). Morfometría Geométrica y el Estudio de las Formas Biológicas: De la Morfología Descriptiva a la Morfología Cuantitativa Geometric Morphometry and the Biologic Shapes Study: From the Descriptive Morphology to the Quantitative Morphology. *International Journal of Morphology* (Vol. 28, Issue 4).
- Velasco, A. (2017). Variabilidad genética y distribución espacial del lirio azteca (*Sprekelia formosissima*). Tesis de maestría. Universidad de Guadalajara. [http://repositorio.cucba.udg.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/6080/Velasco\\_Ramirez\\_Alejandro.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.cucba.udg.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/6080/Velasco_Ramirez_Alejandro.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Villanueva, E. (1998). *Prospección arqueológica por medios geofísicos y químicos en Cuicuilco*. México, D.F.: Sigma.
- Yang, J., La Sorte, F. A., Pyšek, P., Yan, P., Nowak, D., y McBride, J. (2015). The compositional similarity of urban forests among the world's cities is scale dependent. *Global Ecology and Biogeography*, 24, 1413–1423.
- Zelditch, M., Swiderski, D., y Sheets, H. (2012). *Geometric Morphometrics for Biologists: A Primer*. Elsevier: Academic Press (2th ed).