



# UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD  
DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y  
TECNOLÓGICAS

POSGRADO EN BIOCENCIAS

---

## CALIDAD BIOLÓGICA DEL AIRE DE LA CIUDAD DE HERMOSILLO, SONORA, EN EL AÑO 2018: POLEN AEROVAGANTE.

TESIS

que para obtener el grado de:

**MAESTRA EN BIOCENCIAS**

presenta:

**ANA LAURA VACAME OCEJO**

Hermosillo, Sonora, México

17 de diciembre de 2021

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

Hermosillo, Sonora a 17 de diciembre del 2021

Asunto: Cesión de derechos

**UNIVERSIDAD DE SONORA  
P R E S E N T E.**

Por este conducto hago constar que soy autor y titular de la obra denominada **CALIDAD BIOLÓGICA DEL AIRE DE LA CIUDAD DE HERMOSILLO, SONORA, EN EL AÑO 2018: POLEN AEROVAGANTE**, en los sucesivo LA OBRA, realizada como trabajo terminal con el propósito de obtener el Grado de **Maestra en Biociencias** virtud de lo cual autorizo a la Universidad de Sonora (UNISON) para que efectúe la divulgación, publicación, comunicación pública, distribución, distribución pública, distribución electrónica y reproducción, así como la digitalización de la misma, con fines académicos o propios de la institución y se integren a los repositorios de la universidad, estatales, regionales, nacionales e internacionales.

La UNISON se compromete a respetar en todo momento mi autoría y a otorgarme el crédito correspondiente en todas las actividades mencionadas anteriormente.

De la misma manera, manifiesto que el contenido académico, literario, la edición y en general cualquier parte de LA OBRA son de mi entera responsabilidad, por lo que deslindo a la UNISON por cualquier violación a los derechos de autor y/o propiedad intelectual y/o cualquier responsabilidad relacionada con la OBRA que cometa el suscrito frente a terceros.

ATENTAMENTE



**LIC. GILBERTO LEÓN LEÓN**  
*Abogado General*  
UNIVERSIDAD DE SONORA

---

**ANA LAURA VACAME OCEJO**

Hermosillo, Sonora, México

Diciembre, 2021

**CALIDAD BIOLÓGICA DEL AIRE DE LA CIUDAD DE HERMOSILLO, SONORA,  
ENEL AÑO 2018: POLEN AEROVAGANTE**

**TESIS**

**que para obtener el grado de:**

**MAESTRA EN BIOCENCIAS**

**presenta:**

**ANA LAURA VACAME OCEJO**

**Hermosillo, Sonora, México**

**17 de diciembre del 2021**

## APROBACIÓN

Los miembros del Comité designado para revisar la tesis intitulada **Calidad biológica del aire de la ciudad de Hermosillo, Sonora, en el año 2018: polen aerovagante** presentada por **Ana Laura Vacame Ocejo**, la han encontrado satisfactoria y recomiendan que sea aceptada comorequisito parcial para obtener el grado de Maestra en Biociencias.



Dra. María Cristina Peñalba Garmendia  
Directora



Dr. Alf Enrique Meling López  
Secretario



Dr. Carlos Lizárraga Celaya  
Sinodal



Dra. Jordina Belmonte Soler  
Sinodal externo

## **DEDICATORIA**

A mi familia.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado para la realización de este proyecto.

A la Universidad de Sonora y al Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas por la facilitación de las instalaciones.

Al Posgrado en Biociencias por ofrecer este programa.

A mi Directora la Dra. Cristina Peñalba por ser tan amable, atenta y un excelente ser humano, siempre con la disponibilidad de ayudarme en cualquier momento que lo requerí. Agradezco su paciencia conmigo, los conocimientos transmitidos y los ánimos que siempre me dio.

A mi Comité de tesis por sus buenos consejos y toda la ayuda brindada para que este trabajo se realizara lo mejor posible, en especial al Dr. Alf Meling por su apoyo en la parte de diversidad y fenología floral; al Dr. Carlos Lizárraga por su apoyo en todo lo relacionado a clima y meteorología; a la Dra. Jordina Belmonte por sus valiosas aportaciones en lo referente a aerobiología y a la Dra. María Magdalena Ortega † por sus buenos comentarios acerca del trabajo.

A Mario Acosta por el apoyo en los conteos.

A mis amigos Gaby, Andrea, Adrianita y Omar, y especialmente a mis mejores amigos Myriam y Dojaque por animarme, escucharme, aconsejarme y alejar el aburrimiento de mí.

A todas las personas que han contribuido de alguna forma para mi realización.

## RESUMEN

La ciudad de Hermosillo, Sonora, localizada en el sureste del Desierto Sonorense, presenta condiciones ambientales que favorecen la suspensión y resuspensión de polen en la atmósfera, causando una mala calidad biológica del aire y problemas en la salud de la población. En esta zona, el contenido polínico del aire ha sido poco investigado. Por tal motivo, se estudió la calidad biológica del aire de la ciudad de Hermosillo en el año 2018. Se determinó el contenido de polen aerovagante y su relación con la meteorología y la fenología floral, así como la diversidad polínica mensual. En 2018, la Integral Polínica Anual alcanzó 19,841 polen \* día/m<sup>3</sup>. Los tipos polínicos más abundantes fueron Poaceae, Amaranthaceae, *Ambrosia* y Cupressaceae, que aportaron más del 80 % de granos de polen a la atmósfera. El contenido polínico diario se vio favorecido por las altas temperaturas y la humedad relativa, y afectado por la dirección del viento. Por primera vez en Sonora, se estudió la dinámica semidiurna de los principales tipos polínicos. Poaceae, *Ambrosia* y Cupressaceae exhibieron un patrón irregular con variaciones respecto a las concentraciones polínicas de la mañana y la tarde. Amaranthaceae mostró un patrón semidiurno definido, donde el mayor aporte polínico se dio en la primera mitad del día. La diversidad de tipos polínicos más alta se presentó en los meses de primavera, y se correlacionó negativamente con la humedad relativa. Por otra parte, pocas taxa presentaron correlación significativa entre su floración local y el polen capturado en la atmósfera, lo que se atribuye a la complejidad multifactorial del proceso de dispersión polínica en regiones áridas. Este estudio determinó que la calidad biológica del aire de la ciudad de Hermosillo fue mala de agosto a noviembre debido a la presencia y abundancia de pólenes con alto potencial alergénico como Poaceae, Amaranthaceae y *Ambrosia*.

## ABSTRACT

The city of Hermosillo, Sonora, located in the southeast of the Sonoran Desert, has environmental conditions that favor the suspension and re-suspension of pollen in the atmosphere, causing poor biological air quality and health problems for population. In this area, air pollen content has been very little investigated. For this reason, biological air quality of Hermosillo city in 2018 was studied. Airborne pollen content and its relation with meteorology and floral phenology, as well as monthly pollen diversity, were determined. In 2018, the Annual Pollen Integral reached 19,841 pollen \* day/m<sup>3</sup>. The most abundant pollen types were Poaceae, Amaranthaceae, Ambrosia and Cupressaceae, which contributed more than 80% of pollen grains to the atmosphere. Daily pollen content was favored by high temperatures and relative humidity, and affected by wind direction. For the first time in Sonora, semidiurnal dynamics of the main pollen types were studied. Poaceae, Ambrosia and Cupressaceae displayed an irregular pattern with variations respect to pollen concentrations in the morning and afternoon. Amaranthaceae showed a defined semidiurnal pattern, where the highest pollen contribution occurred in the first half of the day. The highest diversity of pollen types occurred in the spring months, and was negatively correlated with relative humidity. On the other hand, few taxa showed a significant correlation between their local flowering and the atmosphere captured pollen, which is attributed to the multifactorial complexity of the pollen dispersal process in arid regions. This study determined that the biological air quality in Hermosillo city was poor in the months of August to November due to the presence and abundance of pollens with high allergenic potential such as Poaceae, Amaranthaceae and *Ambrosia*.

## ÍNDICE GENERAL

	<b>Página</b>
_Toc144976467 APROBACIÓN .....	1
DEDICATORIA .....	2
AGRADECIMIENTOS .....	3
RESUMEN .....	4
ABSTRACT .....	5
ÍNDICE DE FIGURAS .....	8
ÍNDICE DE TABLAS .....	10
INTRODUCCIÓN .....	1
I. ANTECEDENTES .....	3
I.1. Calidad del aire .....	3
I.1.1. Calidad del aire en México .....	3
I.1.1.1. Calidad del aire en Hermosillo .....	4
I.2. Aerobiología .....	6
I.3. Atmósfera .....	6
I.3.1. Capa límite planetaria .....	7
I.4. Clima .....	9
I.4.1. Clima del Desierto Sonorense .....	10
I.4.1.1. Temperatura .....	11
I.4.1.2. Patrón anual de precipitación .....	12
I.4.2. Monzón de Norteamérica .....	13
I.4.3. Efectos del fenómeno climático El Niño .....	14
I.5. Vegetación regional .....	15
I.5.1. Vegetación nativa de las Planicies del Desierto Sonorense .....	16
I.5.2. Vegetación urbana .....	16
I.6. El polen .....	17
I.6.1. Morfología polínica .....	17
I.6.2. Contenido polínico en la atmósfera .....	20
I.6.3. Polen y fenología floral .....	21
I.6.4. Efectos del polen en la salud .....	22
I.7. Estudios aerobiológicos en zonas áridas y semi áridas .....	23
I.8. Estudios aerobiológicos en México .....	24
II. HIPÓTESIS .....	25
III. OBJETIVOS .....	26
III.1. Objetivo general .....	26
III.2. Objetivos específicos .....	26
IV. MATERIALES Y MÉTODOS .....	27
IV.1. Descripción del área de estudio .....	27

IV.2. Metodología.....	29
IV.2.1. Muestreo aerobiológico.....	29
IV.2.2. Captador de partículas tipo Hirst.....	30
IV.2.3. Obtención y preparación de muestras aerobiológicas.....	31
IV.2.4. Análisis de muestras aerobiológicas.....	31
IV.2.5. Estaciones polínicas.....	33
IV.2.6. Meteorología, clima y análisis estadístico.....	34
IV.2.7. Retro-trayectorias de vientos.....	34
IV.2.8. Floración.....	35
IV.2.9. Listado de vegetación nativa del área urbana de Hermosillo.....	35
IV.2.10. Diversidad polínica.....	35
V. RESULTADOS.....	37
V.1. Listado de vegetación nativa dentro del área urbana de Hermosillo.....	37
V.2. Meteorología.....	40
V.3. Polen atmosférico.....	43
V.3.1. Principales tipos polínicos de la atmósfera.....	48
V.3.2. Polen atmosférico diario y meteorología.....	54
V.3.3. Dinámica semidiurna de los principales tipos polínicos.....	55
V.3.4. Retro-trayectorias de polen extra-local.....	59
V.4. Diversidad polínica.....	67
V.5. Floración.....	69
VI. DISCUSIÓN.....	72
VI.1. Polen atmosférico de Hermosillo.....	72
VI.2. Dinámica del polen atmosférico a lo largo del año.....	73
VI.2.1. Polen diario y meteorología.....	75
VI.3. Dinámica de los principales tipos polínicos y su relación con la meteorología.....	75
VI.3.1. Variaciones semidiurnas de los principales tipos polínicos.....	78
VI.4. Otros tipos polínicos de la atmósfera de Hermosillo.....	81
VI.5. Aporte polínico extra-local por medio del transporte de larga distancia.....	81
VI.6. Relación del espectro polínico y la vegetación.....	82
VI.7. Fenología floral.....	83
VI.8. Diversidad polínica de la atmósfera.....	84
VI.9. Calidad biológica del aire en Hermosillo.....	85
VII. CONCLUSIONES.....	87
VIII. RECOMENDACIONES.....	89
IX. LITERATURA CITADA.....	90

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	Sección vertical de la Tierra y la tropósfera, mostrando la capa límite planetaria, la capa de inversión y la atmósfera libre .....	7
<b>Figura 2.</b>	Cambios en los patrones de circulación atmosférica que favorecen el inicio de la estación lluviosa en el Desierto Sonorense. ....	14
<b>Figura 3.</b>	Formas del polen con base en la relación del eje polar y el eje ecuatorial .....	18
<b>Figura 4.</b>	Ornamentación de la exina en: (A) vista superficial y (B) vista de un corte transversal .....	19
<b>Figura 5.</b>	Tipos de aberturas en los granos de polen .....	20
<b>Figura 6.</b>	Ubicación de la ciudad de Hermosillo y distribución de los principales tipos de vegetación de Sonora, incluyendo al Desierto Sonorense y la subdivisión Planicies de Sonora. ....	28
<b>Figura 7.</b>	Captador de partículas ubicado en la Universidad de Sonora. ....	29
<b>Figura 8.</b>	Componentes de un captador de partículas tipo Hirst . ....	30
<b>Figura 9.</b>	Cinta Melinex (en color gris) sobre regla de metacrilato .....	31
<b>Figura 10.</b>	Método de recuento establecido por la Red Española de Aerobiología.....	32
<b>Figura 11.</b>	Variaciones mensuales de la temperatura media, humedad relativa, precipitación y radiación solar en la ciudad de Hermosillo, en 2018. ....	42
<b>Figura 12.</b>	Rosa de los vientos de la ciudad de Hermosillo, en 2018. ....	43
<b>Figura 13.</b>	Integrales Polínicas Mensuales de la atmósfera de Hermosillo, Sonora, en el 2018.....	47
<b>Figura 14.</b>	Dinámica anual de la concentración polínica diaria en la atmósfera de Hermosillo, Sonora, en 2018.....	47
<b>Figura 15.</b>	Dinámica anual de la concentración diaria de granos de polen de la familia Poaceae en la atmósfera de Hermosillo, Sonora, en el año 2018.....	49
<b>Figura 16.</b>	Dinámica anual de la concentración diaria de granos de polen de la familia Amaranthaceae en la atmósfera de Hermosillo, Sonora, en el año 2018 .....	50
<b>Figura 17.</b>	Dinámica anual de la concentración diaria de granos de polen de Ambrosia en la atmósfera de Hermosillo, Sonora, en 2018 .....	51
<b>Figura 18.</b>	Dinámica anual de la concentración diaria de granos de polen de la familia Cupressaceae en la atmósfera de Hermosillo, Sonora, en el año 2018 .....	52
<b>Figura 19.</b>	Dinámica de la concentración diaria de Bucida buceras, Parkinsonia, Phoenix roebelenii y Prosopis a lo largo del 2018. ....	53
<b>Figura 20.</b>	Dinámica semidiurna de Poaceae durante la estación polínica. ....	56
<b>Figura 21.</b>	Dinámica semidiurna de Amaranthaceae durante la estación polínica. ....	57

<b>Figura 22.</b>	Dinámica semidiurna de <i>Ambrosia</i> durante las estaciones polínicas.....	57
<b>Figura 23.</b>	Dinámica semidiurna de <i>Cupressaceae</i> durante las estaciones polínicas.....	58
<b>Figura 24.</b>	Retro-trayectorias de vientos en los días a) 14/04/2018, b) 10/09/2018 y c) 11/09/2018, en Hermosillo, Sonora.....	60
<b>Figura 25.</b>	Registros de <i>Artemisia</i> en EE. UU (a) y noroeste de México (b), de la Red de Herbarios del Noroeste de México.....	60
<b>Figura 26.</b>	Retro-trayectorias de vientos en los días a) 18/04/2018 y b) 22/04/2018, en Hermosillo, Sonora.....	61
<b>Figura 27.</b>	Registros de <i>Carya illinoensis</i> en el noroeste de México, obtenidos de la Red de Herbarios del Noroeste de México.....	61
<b>Figura 28.</b>	Retro-trayectorias de vientos en los días a) 13/03/2018, b) 31/03/2018 y c) 14/04/2018, en Hermosillo, Sonora.....	62
<b>Figura 29.</b>	Registros de <i>Cupressaceae</i> en EE. UU (a) y noroeste de México (b), de la Red de Herbarios del Noroeste de México.....	63
<b>Figura 30.</b>	Retro-trayectorias de vientos en los días a) 05/05/2018, b) 05/06/2018 y c) 23/06/2018, en Hermosillo, Sonora.....	64
<b>Figura 31.</b>	Registros de <i>Pinus</i> en el norte de México, obtenidos de la Red de Herbarios del Noroeste de México. ....	64
<b>Figura 32.</b>	Retro-trayectorias de vientos en los días a) 23/03/2018 y b) 26/03/2018, en Hermosillo, Sonora.....	65
<b>Figura 33.</b>	Registros de <i>Platanus</i> en el norte de México, obtenidos de la Red de Herbarios del Noroeste de México.....	65
<b>Figura 34.</b>	Retro-trayectorias de vientos en los días a) 15/04/2018, b) 23/06/2018 y c) 27/06/2018, en Hermosillo, Sonora.....	66
<b>Figura 35.</b>	Registros de <i>Quercus</i> en EE. UU (a) y noroeste de México (b), de la Red de Herbarios del Noroeste de México.....	66
<b>Figura 36.</b>	Diversidad mensual de tipos polínicos, incluyendo el Índice de Shannon (H), la Equitatividad (J) y la diversidad máxima (H <sub>máx</sub> ). ....	67
<b>Figura 37.</b>	Diversidad polínica mensual (H') y la humedad relativa.....	68
<b>Figura 38.</b>	Calendario anual de floración de plantas cercanas al captador de partículas.....	70

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b>	Características del sistema de clasificación de Köppen (tomado de Chen y Chen, 2013).....	10
<b>Tabla 2.</b>	Listado de especies nativas en un radio de 5 km alrededor del captador de partículas,obtenido mediante la Red de Herbarios del Noroeste de México.....	37
<b>Tabla 3.</b>	Parámetros meteorológicos obtenidos en la ciudad de Hermosillo, en 2018 (CESAVE-SIAFESON, 2020).....	40
<b>Tabla 4.</b>	Contenido polínico anual de la atmósfera de Hermosillo, Sonora, en el año 2018. ....	44
<b>Tabla 5.</b>	Taxa nativos registrados en la atmósfera de Hermosillo. ....	46
<b>Tabla 6.</b>	Características de la estación polínica de los taxa más abundantes, incluyendo el inicio,final y duración de la estación, así como la concentración máxima diaria. .	54
<b>Tabla 7.</b>	Correlación de Spearman (* $p < 0.05$ ) de las concentraciones polínicas diarias de Hermosillo en 2018, los principales tipos polínicos dentro de su estación polínica y los parámetros meteorológicos. ....	55
<b>Tabla 8.</b>	Correlación de Spearman (* $p < 0.05$ ) de las concentraciones de los tipos polínicos más abundantes, divididas en mañana y tarde y los parámetros meteorológicos.....	58
<b>Tabla 9.</b>	Correlación de Spearman (* $p < 0.05$ ) del valor mensual del Índice de Shannon ( $H'$ ) y las variables meteorológicas. ....	68
<b>Tabla 10.</b>	Correlación de Spearman (* $p < 0.05$ ) de los datos de floración con los datos polínicos.....	71

## INTRODUCCIÓN

La contaminación ambiental es un grave problema que afecta en mayor medida a las grandes ciudades del mundo. Uno de los principales contaminantes que se libera a la atmósfera es el dióxido de carbono, el cual, a su vez, es uno de los gases causantes del efecto invernadero, el calentamiento global y el consecuente Cambio Climático (Caballero *et al.*, 2007; Solomon *et al.*, 2008). Son determinantes también las concentraciones de partículas suspendidas totales, tanto inorgánicas (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>), como orgánicas (polen y esporas), mismas que aumentan con el cambio de uso de suelo y el desarrollo de la urbanización, generando una baja calidad del aire y cuadros alérgicos (Meza-Figueroa *et al.*, 2007). El Cambio Climático, a su vez, afecta la dinámica espaciotemporal del polen alérgico aerovagante (Emberlin, 1994; Jäger *et al.*, 1996; Rasmussen, 2002; D'Amato *et al.*, 2007; Ziska *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2015; Katelaris y Begg, 2017), la cual depende de la respuesta de las plantas a factores climáticos y meteorológicos como la temperatura, la radiación solar, la humedad y la precipitación (Ziska *et al.*, 2008; Rocha-Estrada *et al.*, 2009), entre otros. La evidencia médica señala un continuo aumento en la población mundial que sufre de alergias, siendo el polen una de las principales fuentes causantes de esta reacción del sistema inmunitario (Valero-Santiago y Cadahía-García, Eds., 2002; Calderón-Ezquerro *et al.*, 2016).

En regiones templadas, con base en décadas de estudios aerobiológicos ya se han establecido calendarios polínicos y se está estudiando la variabilidad de la dispersión de biopartículas y su relación con las condiciones meteorológicas, a partir del estudio de series de tiempo (Laín y Bustillo, 1982; Gutiérrez *et al.*, 2006; de Weger *et al.*, 2013; Lo *et al.*, 2019). Estos estudios muestran que es necesario mantener un monitoreo atmosférico continuo, ya que la variabilidad atmosférica y oceánica multianual determina cambios en los períodos fenológicos y la intensidad de la floración de árboles, arbustos y hierbas, incluidas las plantas alergógenas.

En regiones tropicales y subtropicales los estudios aerobiológicos son todavía incipientes. En la ciudad de Hermosillo, Sonora, que se encuentra localizada en el Desierto Sonorense, las condiciones ambientales como la baja humedad relativa facilitan la suspensión

y resuspensión de material particulado a la atmósfera, propiciando así una mala calidad del aire. Por otra parte, las proyecciones futuras del Cambio Climático indican un continuo aumento de las temperaturas, cambios en los patrones de precipitación y mayor incidencia de fenómenos extremos (Katelaris y Begg, 2017), lo que augura problemas ambientales suplementarios relacionados con la calidad del aire. Es por ello que se necesita un conocimiento acerca del contenido de partículas de la atmósfera y su dinámica, que conduzca a la mitigación, prevención y control de los efectos en la salud humana. El presente trabajo se enfocará en determinar el contenido polínico de la atmósfera de Hermosillo en el año 2018, asimismo, establecer su relación con la fenología y las condiciones meteorológicas que se presentaron ese año.

## **I. ANTECEDENTES**

### **I.1. Calidad del aire**

El aire limpio es un requisito básico de la salud y el bienestar humanos (OMS, 2006). El aire se compone principalmente de nitrógeno, oxígeno, vapor de agua, gases nobles y dióxido de carbono, entre otros (INE, 2010). La calidad del aire se puede ver afectada por la presencia de contaminantes como material particulado (PM), ozono (O<sub>3</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), monóxido de carbono (CO), arsénico, cadmio, plomo, mercurio, níquel, benceno y benzopireno (Guerreiro *et al.*, 2011).

La contaminación del aire es una amenaza global que tiene grandes efectos en la salud y los ecosistemas (Guerreiro *et al.*, 2018). Los efectos a la salud incluyen principalmente daños al sistema respiratorio, causando que se desarrollen o agraven enfermedades respiratorias, y dañosa los sistemas cardiovascular y nervioso (Guerreiro *et al.*, 2011). En 2016, 4.4 millones de muertes a nivel global fueron atribuidas a la contaminación ambiental y del aire (WHO, 2018). Por otra parte, la contaminación del aire conduce a varios impactos ambientales importantes, que afectan directamente la vegetación y la fauna, así como también la calidad del agua y suelo (Guerreiro *et al.*, 2018).

En las últimas décadas, la calidad del aire ha sufrido un marcado deterioro en las grandes ciudades de los países en desarrollo (Molina y Molina, 2002). La mala calidad del aire ha sido atribuida al crecimiento poblacional urbano, aunado al cambio de uso de suelo debido a la expansión de las ciudades. El crecimiento poblacional trae consigo un aumento en las emisiones de contaminantes del aire por diversos procesos como el tráfico vehicular, la industria y el uso de combustibles domésticos, entre otros (Meyer, 1999).

#### **I.1.1. Calidad del aire en México**

En la literatura se hace referencia a México como un país con pobres estándares respecto a la calidad del aire. En 1991, después de que la Ciudad de México fuera declarada por las

Naciones Unidas como una de las ciudades con peor calidad del aire del mundo, en México se tomaron medidas que lograron la reducción de emisiones y mejoraron sustancialmente la calidad del aire. Posteriormente, en 1993, la Secretaría de Salud propuso al congreso mexicano una serie de normas que permitieran regular las emisiones atmosféricas. En estas normas de calidad del aire se establecieron valores máximos permisibles de los niveles de concentración de partículas como el ozono, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, PST, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, entre otras (de la Fuente-Ruiz *et al.*, 2013). No obstante, en la actualidad el nivel de contaminación de las principales urbes del país sigue siendo elevado (Silva-Rodríguez de San Miguel, 2019). De hecho, en el reporte del Clean Air Institute (2012) se encontró que México había rebasado los límites recomendados por la Organización Mundial de la Salud en cuanto a contaminantes del aire como partículas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> y óxidos de nitrógeno, en algunas de las principales ciudades del país.

A pesar de que, a nivel general, la calidad del aire en México es mala, el país cuenta con uno de los mejores sistemas de monitoreo de calidad del aire de Latinoamérica (Clean Air Institute, 2012; Riojas-Rodríguez *et al.*, 2016), con alrededor de ochenta estaciones de monitoreo que proveen mediciones de la calidad del aire de manera regular. Sin embargo, en 2010, no todas las estaciones proporcionaban mediciones anuales válidas en cuanto a PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> (Riojas- Rodríguez *et al.*, 2016).

#### I.1.1.1. Calidad del aire en Hermosillo

Se han llevado a cabo algunos trabajos acerca de la calidad del aire y del contenido de partículas de la atmósfera en Hermosillo, enfocados a contaminantes inorgánicos (Meza-Figueroa *et al.*, 2007; Ramírez-Leal *et al.*, 2007; Ramírez-Leal *et al.*, 2009; Cruz-Campas *et al.*, 2013; Cruz- Campas *et al.*, 2017). Cruz-Campas *et al.* (2017) analizaron la calidad del aire respecto a metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu y Cr) y su relación con la salud respiratoria de seis ciudades de Sonora, incluyendo Hermosillo. Se encontró que, en ninguna de las ciudades, excepto Nogales donde el promedio anual de Ni rebasó el criterio establecido en la normatividad europea, se rebasaron los máximos permisibles utilizados como referencia para evaluar la calidad del aire. En cuanto al daño a la salud por metales pesados, se encontró una

correlación significativa entre las infecciones respiratorias agudas y Cu en Hermosillo y Obregón, y Ni y neumonías- bronconeumonías en Guaymas.

En otro estudio de Cruz-Campas *et al.* (2013), se evaluó la calidad del aire de la ciudad de Hermosillo, respecto a partículas suspendidas totales (PST) y metales pesados en el periodo de junio 2001 a mayo del 2002, en tres sitios de muestreo. Se encontró que en dos de los tres sitios frecuentemente se rebasó el límite permisible para 24 h de PST, mientras que en el total de los sitios de monitoreo se rebasó el límite anual máximo permisible establecido por la Norma NOM-024-SSA1-1993, vigente en el momento del estudio. Se compararon las concentraciones de PST y metales pesados de Hermosillo con los límites establecidos por diversas instituciones (WHO, EEA, entre otras), y se determinó que las concentraciones de metales pesados no representaron riesgo para la salud de la población. Sin embargo, la calidad del aire se calificó como no satisfactoria debido a las altas concentraciones de material particulado.

En el trabajo de Meza-Figueroa *et al.* (2007), se estudió el contenido de metales pesados (Ni, Cr, Zn, Cd, Co, Ba, V, Pb, Fe y Cu) de la ciudad de Hermosillo, analizando el polvo sedimentado de los techos de veinticinco escuelas. Los resultados mostraron que las concentraciones de metales pesados fueron mayores en el área sur que en el área norcentral. Se encontraron concentraciones elevadas de Zn, Cr, Pb y Cd en muestras de polvo de los techos cerca de áreas industriales. Un análisis de componentes principales reveló que las posibles fuentes de Zn, Cr, Pb y Cd fueron las industrias y el tráfico; el Fe, Co y Ba se derivaron principalmente de fuentes naturales, y V y Ni estuvieron posiblemente relacionados con procesos de combustión. Por otra parte, los trabajos de Ramírez-Leal *et al.* (2007; 2009) se dedicaron a evaluar y caracterizar fisicoquímicamente el contenido de partículas inorgánicas de la atmósfera de Hermosillo en diferentes años.

En general, los estudios sobre calidad del aire, especialmente en Hermosillo, suelen enfocarse principalmente a contaminantes inorgánicos como metales pesados y material particulado PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, puesto que estos últimos son los contaminantes del aire más relevantes para la salud, ya que son capaces de penetrar profundamente dentro de los pulmones (Riojas-Rodríguez *et al.*, 2016). No obstante, también se han realizado trabajos enfocados a

investigar las partículas biológicas presentes en el aire (aerobiología), que, en función de su contenido, pueden repercutir en la calidad del aire (Ortega-Rosas *et al.*, 2020a).

## **I.2. Aerobiología**

El término aerobiología fue acuñado por primera vez en 1930 por Fred Campbell Meier, quien utilizó la palabra para describir a los microbios en el aire (Lacey y West, 2006). La aerobiología involucra el estudio de las partículas biológicas que se encuentran presentes en el aire (Lacey y West, 2006; Agashe y Caulton, 2009). Se encarga del estudio de la diversidad de biopartículas aerovagantes, así como también de los procesos involucrados en su movimiento, entre ellos la liberación, emisión, dispersión, deposición e impacto (Benninghoff, 1991; Fernstorm y Goldblatt, 2013).

El aire contiene muchos tipos de contaminantes, orgánicos e inorgánicos, cada uno de ellos con características diversas de tamaños y formas. La aerobiología se enfoca a los microorganismos o parte de organismos pasivamente transportados por el aire que forman parte de la aeromicrobiota (Agashe y Caulton, 2009). La microbiota del aire se conforma por virus, bacterias, hongos, esporas, polen, fragmentos de pequeñas semillas, protozoarios, ácaros e insectos y su material fecal, entre otros (Lacey, 1996). Es tan compleja la variedad de formas de vida y de elementos biológicos que conforman la aerobiota que se ha llegado a sugerir que la atmósfera en sí misma es un ecosistema (Gutiérrez-Bustillo *et al.*, 2016).

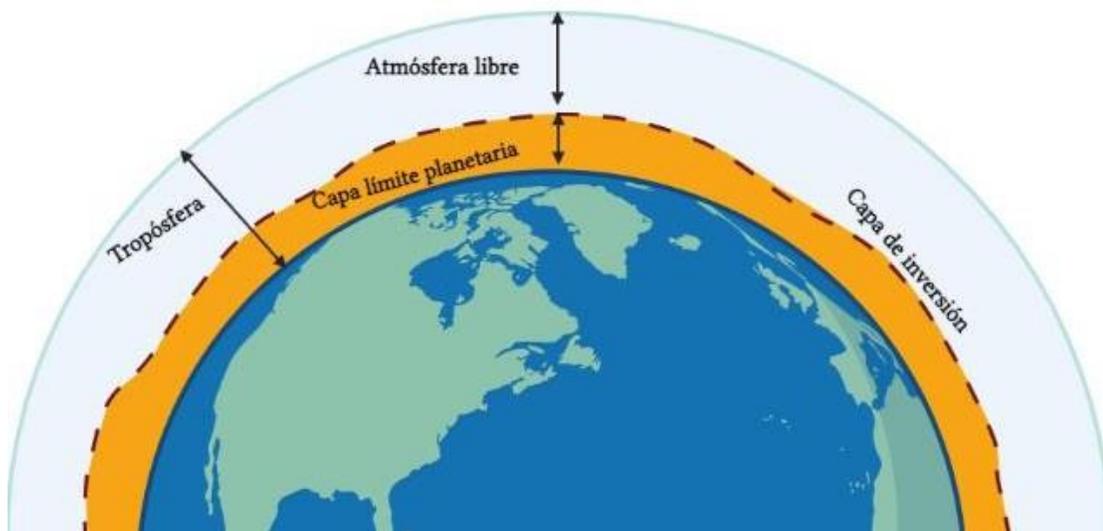
## **I.3. Atmósfera**

La atmósfera de la Tierra es una capa de mezcla de gases que envuelve al planeta y lo protege de los rayos del sol y de material espacial que pudiera colisionar con él. La atmósfera se extiende cientos de km hacia el exterior de la Tierra. Sin embargo, el 99 % de la masa de la atmósfera se encuentra dentro de los primeros 30 km (Ahrens, 2001). La atmósfera puede dividirse en capas horizontales con base en su temperatura (Barry y Chorley, 2003). La capa más baja se denomina tropósfera, y se extiende a una altura que varía entre los 9 y 15 km (Saha, 2008). En esta zona los fenómenos meteorológicos y las turbulencias son más marcados

que en otras capas; además, la tropósfera contiene el 75 % del total de moléculas y gases de la atmósfera, así como prácticamente todo el vapor de agua y aerosoles (Barry y Chorley, 2003), por lo que esta capa es la de mayor relevancia para estudios enfocados en determinar la calidad del aire.

### I.3.1. Capa límite planetaria

Por conveniencia, se puede dividir a la tropósfera en dos capas principales: la capa límite planetaria o capa límite y la atmósfera libre. Además, existe una capa fuertemente estable llamada capa de inversión entre la capa límite planetaria y la atmósfera libre (**Figura 1**). Esta capa estable atrapa la turbulencia, los contaminantes y la humedad debajo de ella y atenúa los efectos de la fricción de la superficie en la atmósfera libre (Wallace y Hobbs, 2006).



**Figura 1.** Sección vertical de la Tierra y la tropósfera, mostrando la capa límite planetaria, la capa de inversión y la atmósfera libre (modificado de Wallace y Hobbs, 2006).

La capa límite es la porción de la tropósfera que está directamente influenciada por la presencia de la superficie terrestre y responde a forzamientos superficiales con una escala de tiempo de aproximadamente una hora o menos (Stull, 1988; Stensrud *et al.*, 2015). Los forzamientos incluyen arrastre por fricción, evaporación y transpiración, transferencia de calor, emisión de contaminantes y modificación del flujo inducida por el terreno (Stull, 1988). Estas fuerzas son importantes porque afectan los patrones climáticos y la tasa de intercambio de material particulado entre la capa límite planetaria y la atmósfera libre sobre ella (Abayomi, 2013).

La altura de la capa límite es variable en el espacio y tiempo (Wallace y Hobbs, 2006). Normalmente oscila entre los 100 a 3000 m (Luo y Zhou, 2006). La variabilidad en la altura se caracteriza por ciclos diarios influenciados por variaciones en la temperatura superficial del aire, humedad relativa, flujo radiativo neto o estabilidad atmosférica (Arruda Moreira, 2018). En general, un mayor calentamiento de la superficie significa mayor altura de la capa límite planetaria. Por lo que, en los desiertos, la capa límite se puede extender hasta 4000 o 5000 m (Pielke y Hayden, 2016).

Durante el día, la superficie del suelo se calienta más que el aire (Wallace y Hobbs, 2006), haciendo que la capa límite se extienda varios km sobre el suelo y se vuelva completamente turbulenta (Stensrud *et al.*, 2015). Las turbulencias convectivas predominan durante el día, y son impulsadas por la flotabilidad que crea parcelas ascendentes de aire caliente y un descenso del aire frío que es desplazado por el cálido (Warner, 2004). Las turbulencias convectivas son extremadamente eficientes en la mezcla de la capa límite. De hecho, son responsables de la dispersión eficiente de los contaminantes que acompañan la vida moderna. No obstante, la capa de inversión se encarga de mantener esos contaminantes dentro de la capa límite (Wallace y Hobbs, 2006).

Por la noche, se dice que la capa límite es estable porque la superficie del suelo es más fría que la del aire (Wallace y Hobbs, 2006). La altura de la capa límite puede ser de unas pocas decenas de metros y las turbulencias son intermitentes (Stensrud *et al.*, 2015). Las turbulencias impulsadas por la cizalladura son más comunes durante la noche. Se relacionan con la tasa de cambio de la velocidad del viento horizontal con la altura. Si la cizalladura es pequeña y no

hay flotabilidad, el flujo no es turbulento. Pero si la cizalladura excede cierto umbral, el flujo se vuelve turbulento (Warner, 2004).

La capa límite juega un papel esencial en la vida de las personas debido a que la gran mayoría de ellas pasa toda su vida dentro de esta capa. Algunos ejemplos de los procesos que suceden en la capa límite son: procesos meteorológicos diarios (rocío, heladas, temperatura mínima y máxima, entre otros); absorción de la radiación solar en el suelo y transferencia al resto de la atmósfera y distribución del polen por las corrientes de la capa límite (Stull, 1988), entre muchos otros.

#### **I.4. Clima**

El clima se define como una descripción estadística del estado del tiempo en un periodo lo suficientemente largo (>30 años) (Chen y Chen, 2013). El tipo de clima de cualquier región, así como el tiempo que se presenta diariamente es producido por fuerzas externas y dinámicas internas del sistema climático, entre ellas la radiación y su variación con la latitud, la distribución tierra-agua, las corrientes oceánicas, los vientos predominantes, la posición de las áreas de baja y alta presión, las barreras montañosas y la altitud. Estos factores determinan la gran variedad de tipos de climas que existen en el mundo (Ahrens, 2001).

Para diferenciar los tipos de clima se han creado diversos sistemas de clasificación climática basados en distintos parámetros, principalmente en la temperatura y la precipitación. El sistema de clasificación de Köppen (1900) se basa en las temperaturas y la precipitación para definir distintos climas alrededor del mundo. Este sistema de clasificación (**Tabla 1**) es uno de los más usados mundialmente, y consiste en cinco grupos principales (tropical, seco, templado, frío y polar) y varios subtipos de cada grupo (Chen y Chen, 2013). Los tipos de clima del sistema de clasificación de Köppen están definidos para marcar las zonas climáticas del mundo que se extienden conforme a la latitud. En México, las diferencias en el clima no solo están determinadas por la latitud, sino que además intervienen las diferencias en la altitud (García, 1966). Por ello, este sistema de clasificación tuvo que ser adaptado y modificado por García (1966) para que se correspondiera mejor con las condiciones de los climas de México.

**Tabla 1.** Características del sistema de clasificación de Köppen (tomado de Chen y Chen, 2013).

<b>Grupo</b>	<b>Subtipos</b>
A: Tropical	Bosque tropical lluvioso: Af Bosque tropical con lluvias de Monzón: Am Sabana tropical húmeda y seca: Aw
B: Seco	Desierto (árido): BWh, BWk Estepa (semi árido): BSh, BSk
C: Templado	Mediterráneo: Csa, Csb, Csc Subtropical húmedo: Cfa, Cwa Oceánico: Cfb, Cfc, Cwb, Cwc
D: Frío	Húmedo: Dfa, Dwa, Dfb, Dwb, Dsa, Dsb Subártico: Dfc, Dwc, Dfd, Dsc, Dsd
E: Polar	Tundra: ET Gélido: EF

#### **I.4.1. Clima del Desierto Sonorense**

El Desierto Sonorense abarca una región de aproximadamente 260,000 km<sup>2</sup> en el noroeste de México y suroeste de Estados Unidos, e incluye gran parte del estado de Sonora y parte de los estados de Arizona, California, Baja California y Baja California Sur (Dimmitt, 2015a). A lo largo del Desierto Sonorense el clima es relativamente uniforme, con diferencias regionales debido a la latitud, altitud y la configuración geográfica del área (Shreve y Wiggins, 1964). Estas diferencias se traducen, en la región circundante al desierto, en una gran variedad de climas y biomas. Los climas predominantes del Desierto Sonorense, así como de Sonora, son los áridos y los tropicales (Axelrod, 1979), y están relacionados con los patrones de circulación atmosférica como el Anticiclón semipermanente del Pacífico Norte y la cercanía de Sonora al Trópico de Cáncer (Brito-Castillo *et al.*, 2010). La conexión entre estos últimos elementos y el clima se describe a continuación.

En la línea del Ecuador, la radiación solar penetra verticalmente a lo largo de todo el año, concentrándose mayor calor en esa franja y dando lugar a una zona de aire cálido y ascendente (Dimmitt, 2015a). En esta zona, donde convergen los vientos alisios de los dos hemisferios, se crea una Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) (que se mueve hacia el norte y sur en función de los cambios angulares del sol), que trata de redistribuir el exceso de calor del Ecuador hacia los polos por medio de celdas de circulación. El aire cálido ascendente

de esta zona se distribuye hacia mayores latitudes, mientras deja la mayor parte de la humedad que tomó del océano en las regiones más cercanas al Ecuador. El aire, ahora seco, desciende cerca de los 30° de latitud en ambos hemisferios, dando lugar a la formación de sistemas de alta presión subtropicales. Estos sistemas traen consigo una atmósfera clara y tiempo cálido, seco y de vientos ligeros donde se posicionan. Una importante extensión del Desierto Sonorense se localiza entre los 30° de latitud, por lo que encuentra bajo la influencia de dos sistemas de alta presión: el Anticiclón semipermanente del Pacífico Norte y la Alta de las Bermudas, lo que determina la aridez de la región (Brito-Castillo *et al.*, 2010).

#### I.4.1.1. Temperatura

La radiación solar que llega a la superficie de la Tierra es el principal factor determinante de las temperaturas en el planeta. Esta, a su vez, está determinada por la cantidad de horas de luz y la intensidad de la radiación solar entrante. Ambos factores varían en función de la latitud. Las variaciones en la temperatura que se presentan de un lugar a otro están causadas también por otros factores como la distribución tierra-agua, las corrientes oceánicas y la elevación (Ahrens, 2001).

El Desierto Sonorense se caracteriza por presentar veranos muy cálidos e inviernos suaves (la mayor parte del área rara vez experimenta heladas), gran amplitud térmica y alta variación intraanual respecto a la temperatura del día y noche (Martínez-Yrizar *et al.*, 2010). Además, este desierto es el más cálido de los desiertos de Norteamérica (Turner *et al.*, 2003; Warner, 2004; Weiss y Overpeck, 2005). Sus altas temperaturas estivales se deben a la cantidad de radiación recibida por su cercanía con el Ecuador, pero, también, a la influencia del Anticiclón semipermanente del Pacífico Norte, que favorece los días con cielos claros y sin nubes. Durante el día, el cielo despejado permite que la radiación llegue directamente hacia la superficie y caliente rápidamente el suelo, y, por ende, el aire por encima de él. Por la noche, el suelo se enfría rápidamente radiando energía infrarroja al espacio, lo que causa un amplio rango entre las temperaturas del día y la noche (Ahrens, 2001). Está bien definido que en la mayor parte del Desierto Sonorense las temperaturas máximas ocurren en julio y las mínimas en enero (Turner *et al.*, 2003). En verano, las temperaturas máximas frecuentemente

pueden exceder los 49°C en grandes áreas (Warner, 2004). Por otra parte, las temperaturas de congelación ocurren a través del desierto (excepto en algunas zonas costeras), con una duración de menos de un día. Son comunes en el norte y raras hacia el sur. Estas temperaturas pueden estar ligadas al desplazamiento al oeste del Anticiclón semipermanente del Pacífico Norte (Weiss y Overpeck, 2005).

En las pasadas décadas, Weiss y Overpeck (2005) evaluaron la variabilidad de las temperaturas de congelación del Desierto Sonorense. Los resultados mostraron una tendencia generalizada al calentamiento en invierno y primavera, disminución en la frecuencia de las temperaturas de congelación, mayor duración del periodo libre de heladas y un incremento en las temperaturas mínimas de invierno. Debido a que las temperaturas de congelación tienen gran efecto en la vegetación del desierto, y bajo el inminente aumento del calentamiento global, sus resultados sugieren que el límite del Desierto Sonorense podría reducirse en el sureste y expandirse hacia el norte-este, determinando, asimismo, cambios en la distribución de las plantas.

#### I.4.1.2. Patrón anual de precipitación

La cantidad y la estacionalidad de las lluvias son características que definen al Desierto Sonorense (Dimmitt, 2015a). Aquí, se presenta un patrón de lluvias bimodal, debido a que es una transición entre el régimen de lluvias del Desierto Chihuahuense con lluvias de verano y el del Desierto de Mojave, que recibe la mayor parte de las lluvias en invierno. El comportamiento bimodal de las lluvias en el Desierto Sonorense varía en función de dos gradientes: de oeste a este las lluvias de verano incrementan, al igual que de norte a sur (Turner *et al.*, 2003). En gran parte del desierto las lluvias predominantes ocurren en verano (de julio hasta mediados de septiembre), por efecto del monzón de Norteamérica y representan entre el 60% y 80% del total anual de lluvias (Stensrud *et al.*, 1995). Sin embargo, pueden ocurrir algunas aportaciones importantes a finales de verano y comienzo de otoño como remanentes del monzón. El segundo periodo lluvioso, que es menos intenso, ocurre en invierno a causa de las tormentas frontales que se originan en el Pacífico Norte (Brito-Castillo *et al.*, 2010; Dimmitt, 2015a). En la mayoría de los inviernos los sistemas de baja presión y los

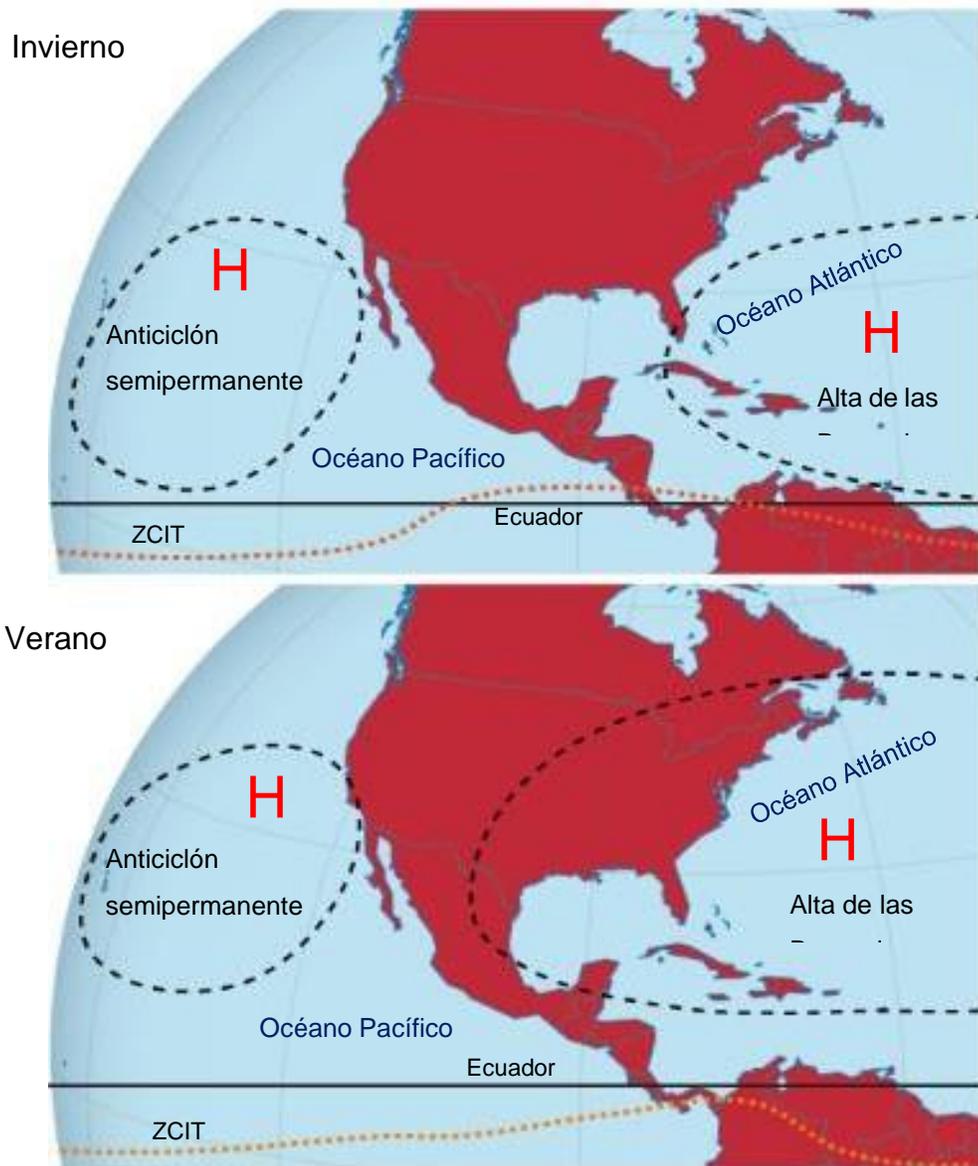
frentes fríos pasan muy al norte y ocasionalmente llegan tan al sur como para causar precipitación (Brito-Castillo *et al.*, 2010).

#### **I.4.2. Monzón de Norteamérica**

El término monzón se deriva de la palabra árabe mausim, que significa estación, y se refiere a cambios estacionales a gran escala del régimen del viento (Ahrens, 2001; Barry y Chorley, 2003). Un sistema de viento monzónico es aquel donde ocurren cambios estacionales en la dirección del viento que proviene de una dirección en verano y de la dirección opuesta en invierno (Ahrens, 2001).

El Desierto Sonorense experimenta un cambio estacional de la dirección de los vientos que regula las precipitaciones de verano. De junio a julio los vientos de niveles cercanos a los 3000 m cambian de noroeste a sureste. Paralelamente, el sistema de alta presión de las Bermudas migra parcialmente desde el Atlántico del este hacia el noreste de México y se intensifica el sistema anticiclónico del Pacífico Norte (**Figura 2**). El calentamiento superficial, la topografía y los patrones de circulación atmosférica interactúan modificando la posición e intensidad del sistema de alta presión, permitiendo que la humedad se transporte, principalmente del Océano Pacífico tropical hacia el occidente de México, dando comienzo a la estación lluviosa de verano (Brito-Castillo *et al.*, 2010).

Aunque la Sierra Madre Occidental se encuentra en el núcleo de actividad de tormentas asociado al monzón de verano, Sonora puede experimentar mucha variabilidad intra e interestival debido a cambios en la posición e intensidad de los sistemas meteorológicos como los sistemas de alta presión. Cambios imperceptibles de estos tipos de circulación pudieran estar conectados con cambios de escala global relacionados con patrones de temperatura superficial del mar (Brito- Castillo *et al.*, 2010).



**Figura 2.** Cambios en los patrones de circulación atmosférica que favorecen el inicio de la estación lluviosa en el Desierto Sonorense (modificado de Brito- Castillo et al., 2010).

### I.4.3. Efectos del fenómeno climático El Niño

El clima de Sonora está fuertemente influenciado por los patrones de temperatura superficial del mar del Pacífico Ecuatorial. A lo largo del Ecuador, las temperaturas superficiales del mar en el Pacífico tienden a oscilar entre cálidas y frías con respecto a un valor definido como normal

(Brito-Castillo *et al.*, 2010). Cuando las temperaturas del este del Pacífico Ecuatorial se vuelven anormalmente cálidas ( $\geq 0.5$  °C por encima de la temperatura normal) por un periodo de tiempo de varios meses, incluyendo generalmente el mes de diciembre, se dice que ocurre el fenómeno climático El Niño (Warner, 2004). Por el contrario, cuando las temperaturas son más frías de lo normal, se habla de la ocurrencia de La Niña.

Como la presión atmosférica y los patrones de circulación están muy relacionados con los cambios en la temperatura superficial del mar, cuando el agua del mar es cálida se forman sistemas de presión superficial débil y enormes áreas de tormentas. Contrario a esto, cuando el agua es fría se forman sistemas de alta presión generando un tiempo seco (Brito-Castillo *et al.*, 2010).

Durante las condiciones El Niño, una piscina de agua cálida que se forma en el Océano Pacíficoecuatorial este cerca de Perú se extiende hacia el norte y hacia el sur, trayendo agua anormalmente cálida hasta la parte más septentrional del Desierto Sonorense. Esto, en general, se traduce en mayor humedad ambiental, pudiendo en ocasiones estar relacionado con precipitaciones invernales por encima del promedio, así como un alto potencial de inundaciones. Por otra parte, La Niña trae consigo menor precipitación en invierno y una tendencia a que el monzón sea más intenso (Turner *et al.*, 2003).

## **I.5. Vegetación regional**

Geográficamente, el estado de Sonora se localiza en la zona de transición donde el límite norte del trópico se encuentra con el límite sur de la región templada, permitiendo una notable mezcla de especies vegetales de origen Neotropical y Neártico (Villaseñor-Gómez *et al.*, 2010). La gran variedad de tipos de vegetación de Sonora está relacionada también con la alta variabilidad climática, edáfica y topográfica de la región. Los tipos de vegetación incluyen manglares, matorrales espinosos, desierto, selva baja caducifolia, pastizales, encinares, bosques de pino-encino y mixtos de coníferas en las áreas de mayor elevación (Martínez-Yrizar *et al.*, 2010). En un gradiente geográfico, la vegetación de origen Neártico se localiza en la parte noreste del estado y hacia el sureste la vegetación Neotropical, mientras que en el desierto la vegetación está representada por integrantes de las dos biorregiones; el Desierto Sonorense se considera el

más tropical de los desiertos de Norteamérica (Van Devender y Brusca, 2015). En el oeste del estado se localiza el Desierto Sonorense; al noreste los pastizales; hacia el sureste la selva baja caducifolia; los matorrales espinosos se extienden en gran parte del sureste y una porción del noreste y los diferentes bosques se ubican en una gran franja de la parte este del estado que corresponde a la Sierra Madre Occidental. En la zona central convergen parte del Desierto Sonorense, el matorral espinoso y pequeñas partes de pastizales y bosque madrense en función de la topografía (**Figura 6**).

### **I.5.1. Vegetación nativa de las Planicies del Desierto Sonorense**

Shreve (1951) dividió la gran región del Desierto Sonorense en siete subregiones basándose en las características, la organización y la distribución de las comunidades vegetales. Cuatro de esas siete subregiones se encuentran dentro del estado de Sonora, entre ellas las Planicies del Sonora. Las Planicies de Sonora se localizan entre las montañas de la Sierra Madre Occidental y la zona costera del centro de Sonora, cubriendo una extensión aproximada de 30,000 km<sup>2</sup> (Martínez-Yrizar *et al.*, 2010). La vegetación está dominada por árboles y arbustos, lo que dio lugar al nombre de desierto arbosufrutescente. Las especies dominantes son *Olneya tesota*, *Encelia farinosa*, *Parkinsonia microphylla* y *Prosopis velutina*. Otras especies representativas de la región son: *Larrea tridentata*, *Fouquieria macdougalii*, *Stenocereus thurberi*, *Pachycereus schottii*, *Carnegiea gigantea* y *Opuntia* spp., entre otras (Shreve y Wiggins, 1964).

### **I.5.2. Vegetación urbana**

La vegetación de la ciudad de Hermosillo se compone en menor medida de especies nativas y en una gran parte de especies introducidas. Entre las especies arbóreas introducidas más abundantes se encuentran: *Ficus benjamina*, *Bucida buceras*, *Prosopis* spp., *Thuja occidentalis*, *Ehretia tinifolia*, *Leucaena leucocephala*, *Citrus aurantium*, *Cupressus sempervirens*, *Washingtonia robusta*, *Delonix regia*, *Azadirachta indica* y *Ficus nitida*, principalmente (Navarro-Navarro y Moreno-Vázquez, 2016). Adicionalmente se cultivan en los patios de las viviendas especies de árboles frutales como durazno (*Prunus persica*), guayaba (*Psidium guajava*), higuera (*Ficus carica*), limón (*Citrus aurantifolia*), naranja (*Citrus sinensis*), mango

(*Mangifera indica*) y mora (*Morus nigra*). Algunas de las especies arbóreas y arbustivas introducidas son invasivas, como *Tamarix* sp., *Parkinsonia aculeata* y *Ricinus communis*, entre otras (Sánchez-Escalante, 2018). Estas se añaden a gran variedad de herbáceas, particularmente Poaceae (dominadas por *Pennisetum ciliare* y *Cynodon dactylon*), Amaranthaceae (*Chenopodium murale*) y Asteraceae (*Lactuca serriola*, *Sonchus asper*, *S. oleraceus* (Sánchez-Escalante *et al.*, 2021), etc.

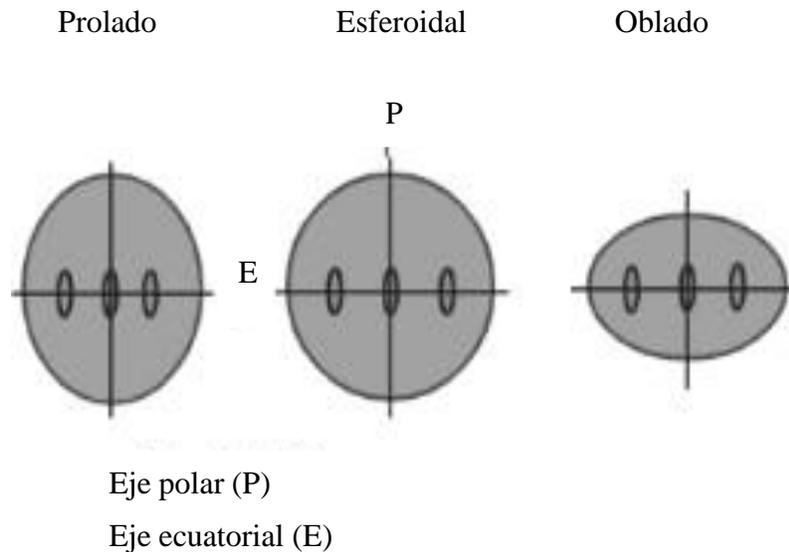
## **I.6. El polen**

Los granos de polen son las estructuras reproductivas masculinas producidas por las angiospermas y gimnospermas, cuya función es transportar las células espermáticas hacia el saco embrionario del óvulo y que se lleve a cabo la fecundación (Agashe y Caulton, 2009). El traslado del polen desde las anteras hacia la parte femenina de la flor se conoce como polinización y puede llevarse a cabo principalmente de dos maneras: por medio del viento (anemófila) y por medio de animales (zoófila), especialmente insectos (entomófila). El polen de la atmósfera es aportado mayormente por plantas con polinización anemófila.

El proceso de polinización requiere que los granos de polen sean sumamente resistentes, pues las condiciones a las que se ven sometidos pueden ser bastante adversas. Es por ello que los granos están cubiertos por una pared muy resistente llamada exina, formada por esporopolenina, uno de los polímeros más resistentes de la naturaleza (Belmonte y Roure, 2002).

### **I.6.1. Morfología polínica**

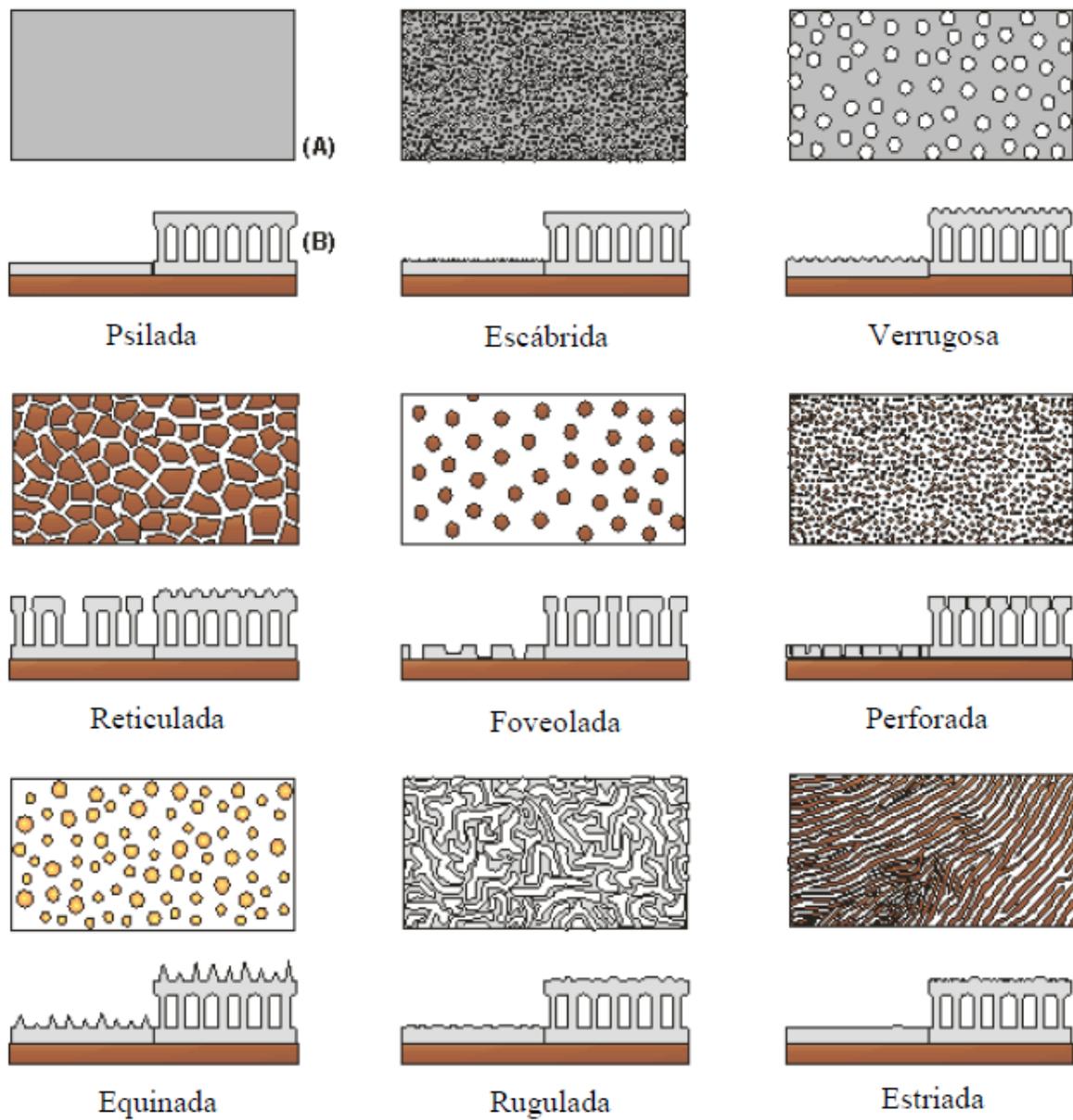
Los granos de polen se caracterizan por su tamaño y forma. En general, el tamaño de los granos oscila entre los 20 y 30  $\mu\text{m}$  (Agashe y Caulton, 2009), aunque pueden medir desde  $<10$  hasta  $>200$   $\mu\text{m}$  (Trigo Pérez *et al.*, 2008). En cuanto a la forma, esta se encuentra en función de la longitud entre los ejes polar y ecuatorial. Se denomina grano prolado cuando el eje polar del grano es mayor que el eje ecuatorial, esferoidal cuando son de igual longitud y oblado cuando el primero es de menor tamaño que el segundo (**Figura 3**). Además de estas características, los granos presentan otros rasgos morfológicos que los distinguen de otros granos como las unidades de dispersión, la ornamentación y las aperturas.



**Figura 3.** Formas del polen con base en la relación del eje polar y el eje ecuatorial (modificado de Belmonte y Roure,2002)

Lo más común es que los granos se dispersen de manera independiente de otros granos, pero también es posible que la dispersión se dé en grupos de dos o más granos. Cuando los granos se liberan de manera independiente se le conoce como mónadas, díadas cuando son grupos de dos, tétradas cuando la agrupación se conforma de cuatro o políadas si son más de cuatro granos (Trigo Pérez *et al.*, 2008).

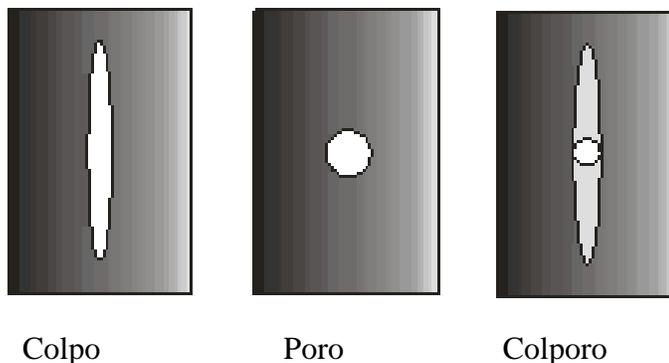
La ornamentación se refiere a las características de la superficie de los granos. La exina puede presentar diversas formas características a lo largo de esta, como se muestra en la **Figura 4**. Puede ser lisa (psilada), formar estrías, retículos, foveólas, tener espinas, verrugas, entre muchas otras (Trigo Pérez *et al.*, 2008).



**Figura 4.** Ornamentación de la exina en: (A) vista superficial y (B) vista de un corte transversal (tomado de Belmonte y Roure, 2002).

Otra característica muy particular de los granos son las aberturas. Una abertura es una zona de adelgazamiento o interrupción de la exina, cuyas funciones son permitir la salida del tubo polínico y regular la humedad de los granos (Trigo Pérez *et al.*, 2008). Dependiendo del tipo de

abertura los granos se pueden clasificar como porados (poros), colpados (colpos), colporados (colpo + poro) o inaperturados (**Figura 5**).



**Figura 5.** Tipos de aberturas en los granos de polen (tomado de Belmonte y Roure, 2002)

### **I.6.2. Contenido polínico en la atmósfera**

El polen que se encuentra en la atmósfera proviene en mayor medida de plantas que son polinizadas por el viento (Cervigón-Morales *et al.*, 2016). Los granos de polen de las plantas anemófilas son pequeños, ligeros en masa, aerodinámicos y con una exina relativamente delgada y con poca ornamentación (Dahl *et al.*, 2013), lo que les permite dispersarse de manera más exitosa en el aire que los granos de plantas zoófilas. Por su parte, las plantas zoófilas no requieren producir una gran cantidad de granos (como las plantas anemófilas) debido a que el transporte del polen hacia la parte femenina de la flor se efectúa por medio de vectores (p.ej. insectos), haciendo el proceso más directo. En los conteos aerobiológicos el número de granos de polen pertenecientes a especies zoófilas tiene baja representatividad, particularmente en regiones tropicales y subtropicales donde la mayoría de las plantas son polinizadas por animales.

La composición del espectro polínico (contenido de tipos polínicos y sus proporciones) de un lugar varía en función de muchos factores, entre ellos la localización geográfica, la vegetación del sitio, la temporada del año y las condiciones climáticas y meteorológicas (Frei, 1998; Rojo *et al.*, 2015, 2017). Las variables meteorológicas como temperatura, radiación solar y humedad relativa tienen una influencia significativa en la cantidad de polen atmosférico ya que se

encargan de regular la dehiscencia de las anteras, lo que conlleva a la reducción o incremento del polen liberado. La velocidad y dirección del viento, así como la precipitación intervienen en la dispersión y transporte del polen en el aire (Rojo *et al.*, 2015). La forma en la que estas y otras variables meteorológicas influyen en el contenido polínico puede variar de un lugar a otro debido a las condiciones de cada sitio.

El periodo durante el cual el polen se encuentra presente en el aire se conoce como estación polínica (Dahl *et al.*, 2013), aunque esta definición puede resultar ambigua para los estudios aerobiológicos. Otra manera más precisa de definir a la estación polínica es el periodo durante el cual se registra un porcentaje dado (determinado de acuerdo con los objetivos del estudio) del total anual de polen en la atmósfera (Jato *et al.*, 2006).

### **I.6.3. Polen y fenología floral**

La fase de floración de la fenología de las plantas determina la época de presencia atmosférica de un determinado tipo polínico (Cervigón-Morales *et al.*, 2016). La fenología involucra el tiempo y la duración de fenómenos biológicos recurrentes, que incluyen eventos reproductivos como floración, producción de frutos y dispersión de semillas de las plantas (Bustamante y Búrquez, 2008). La fenología es una herramienta que permite comprender el comportamiento del polen en la atmósfera. Además, conocer la fenología de la floración facilita la interpretación de los resultados de la investigación aerobiológica (González-Parrado *et al.*, 2015). Dado que se ha observado que la vegetación del área circundante al captador (muestreador) de partículas tiene gran impacto en los conteos de polen aerovagante, ya que la mayoría del polen se dispersa localmente y a una corta distancia de la fuente de emisión (Rojo *et al.*, 2015), llevar a cabo un registro fenológico de la flora cercana al sitio de muestreo puede resultar muy útil para el análisis e interpretación de los datos de un estudio. Por otra parte, estudios integrales de fenología y polen pueden ayudar a tener una visión más clara de los cambios que sufre la vegetación en el contexto del Cambio Climático y del calentamiento global actual, ya que se ha visto que el aumento de las temperaturas debido al calentamiento global está asociado con un inicio más temprano de la floración de las plantas en primavera y verano (Estrella *et al.*, 2006).

#### I.6.4. Efectos del polen en la salud

La presencia del polen en la atmósfera es de gran importancia para que se lleve a cabo la reproducción de muchas plantas. Sin embargo, el polen también es una de las fuentes más importantes de alergias entre la población sensible (Terán *et al.*, 2009; Cervigón-Morales *et al.*, 2016). Se ha demostrado que la exposición a altas concentraciones de ciertos tipos de polen puede causar o agravar padecimientos como las alergias, asma y rinitis (Núñez *et al.*, 2016). El polen contiene proteínas (alérgenos) capaces de interactuar con el sistema inmune de personas sensibilizadas y causar síntomas de alergias. Los síntomas de sensibilidad a alérgenos de polen se desarrollan usualmente después del contacto del polen con la superficie mucosa de los ojos, nariz y garganta de personas sensibilizadas. Como resultado se produce conjuntivitis, congestión nasal, estornudos e irritación de ojos, nariz y garganta (de Weerd *et al.*, 2002).

Desde el punto de vista de la salud, la importancia de un tipo polínico en particular está determinada por el potencial alergógeno del polen y su abundancia en la atmósfera de una región. De manera general, los tipos polínicos de mayor interés, por sus ya conocidos efectos en la salud, particularmente estudiados para regiones templadas, son: *Amaranthaceae*, *Ambrosia*, *Alnus*, *Artemisia*, *Betula*, *Corylus*, *Cupressaceae*, *Olea*, *Platanus*, *Poaceae*, *Quercus* y *Urticaceae* (Skjøth *et al.*, 2013). Estos tipos polínicos presentan un potencial alergógeno elevado, por lo tanto, el desencadenamiento de alergias en la población va a depender de su presencia y de la concentración de polen en la atmósfera de un sitio determinado.

En el estudio de López-Romero *et al.* (2017) para la ciudad de Hermosillo, Sonora, se vio que los pacientes mostraron sensibilización principalmente a los alérgenos del polen de poáceas como *Cynodon dactylon*, *Lolium perenne*, *Zea mays*; de amarantáceas como *Atriplex bracteosa* y de árboles como *Prosopis juliflora*; este último se distribuye a lo largo del Desierto Sonorense. Espinoza-Vizcaíno (2009) menciona que, de acuerdo con pruebas realizadas a pacientes en Sonora, los alérgenos más frecuentes causantes de alergias provienen de polen de quelites (*Amaranthaceae*), zacates como el Bermuda (*Cynodon dactylon*), Johnson (*Sorghum halepense*) y Rye Grass (*Lolium perenne*); mezquite (*Prosopis*) y palo verde (*Parkinsonia*).

En la actualidad las enfermedades alérgicas afectan a casi un tercio de la población del mundo, cifra que ha aumentado en los últimos años debido al calentamiento global (Ortega

Rosas *et al.*, 2019), y se prevé que puedan afectar a la mitad de la población en un futuro próximo (Valero- Santiago y Cadahía-García, Eds, 2002), ya que mayores concentraciones de CO<sub>2</sub> y temperaturas más altas pueden causar estaciones polínicas más largas y severas (Makra *et al.*, 2007). Se han llevado a cabo numerosos estudios en diversos países con el fin de determinar la diversidad y concentración de pólenes debido a los conocidos efectos que estas partículas tienen en las alergias respiratorias (Galán *et al.*, 1991; Dales *et al.*, 2004; García-Mozo *et al.*, 2006; Belmonte *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2015).

### **I.7. Estudios aerobiológicos en zonas áridas y semi áridas**

De manera general, los estudios aerobiológicos en regiones áridas han mostrado una Integral Polínica Anual (InPA) baja (< 20,000 polen \* día/m<sup>3</sup>) y un espectro polínico dominado por pastos y hierbas como Poaceae, Amaranthaceae y Asteraceae, principalmente *Ambrosia*. Entre los trabajos realizados en zonas áridas se pueden mencionar los siguientes:

- En la ciudad desértica de Tucson, Arizona, en Estados Unidos, el trabajo de O' Rourke (1986) mostró que la Integral Polínica Anual promedio fue de 19,658 polen \* día/m<sup>3</sup>. Los principales tipos polínicos de Tucson son Poaceae, Amaranthaceae, *Morus* y *Ambrosia*.
- Ahumada-Valdez *et al.* (2009) estudiaron el polen del aire de Mexicali, Baja California. Encontraron que los tipos polínicos más abundantes en la atmósfera fueron Amaranthaceae, Poaceae, *Castanea sativa* y *Cassia*.
- En Khairpur, una ciudad con clima árido de Pakistán, la InPA fue 4,559 polen \* día/m<sup>3</sup>. Poaceae, Amaranthaceae y *Cyperus* fueron los tipos polínicos más abundantes (Perveen *et al.*, 2014).
- En el estudio de Moreno-Sarmiento (2016) de Hermosillo y Cd. Obregón, Sonora, que poseen un clima árido y semi árido, respectivamente, presentaron una InPA de 16,561 y 538 granos de polen \* día/m<sup>3</sup>. En Hermosillo los principales tipos polínicos fueron Poaceae y Amaranthaceae y en Cd. Obregón Poaceae, Amaranthaceae y Asteraceae.
- En Qatar, donde el desierto abarca la totalidad del territorio, el estudio de Al-Nesf *et al.* (2020) mostró que en la región se alcanzó una InPA de 1977 polen \* día/m<sup>3</sup>. El aporte

principal de polen a la atmósfera provino de plantas nativas como *Amaranthaceae*, *Poaceae* y *Prosopis*.

### **I.8. Estudios aerobiológicos en México**

En México, aunque el desarrollo de la aerobiología es relativamente reciente, se han realizado varios trabajos a lo largo del país desde 1940. El primer registro de polen atmosférico en México fue publicado por Salazar-Mallén (1949), y se llevó a cabo en la Ciudad de México. Posteriormente, surgieron otros estudios como los de Montes-Montes y Cisneros-Pérez (1982); Salazar-Coria (1995); Bronillet-Tarragó (1996); González-Lozano *et al.* (1999); Cid-Martínez (2007), cuyo propósito fue determinar el contenido polínico de la atmósfera de la Ciudad de México. Más adelante, Calderón-Ezquerro *et al.* (2016; 2018) condujeron los primeros estudios de series de tiempo para la Ciudad de México y crearon el primer calendario polínico para la ciudad. En el resto del país, otros estudios aerobiológicos se han llevado a cabo de manera puntal en estados como Yucatán (Ponce-Caballero *et al.*, 2010; 2013), Nuevo León (Rocha-Estrada *et al.*, 2009; 2013), Baja California (Ahumada-Valdez *et al.*, 2006) y Sonora (Moreno-Sarmiento *et al.*, 2016a; 2016b; Ortega-Rosas *et al.*, 2019; 2020).

Desde el 2008 se estableció en México la Red Mexicana de Aerobiología (REMA) con la finalidad de obtener datos continuos de la atmósfera de diversas localidades y brindar información en tiempo real a la población acerca de las concentraciones atmosféricas de los pólenes de mayor interés (REMA, 2021). Actualmente, la REMA cuenta con estaciones de monitoreo en la Ciudad de México, San Luis Potosí, Sinaloa y Sonora. Para el caso particular de Sonora, los datos publicados hasta el momento siguen siendo puntuales. Dado que el contenido aerobiológico atmosférico puede variar ampliamente en función de las condiciones meteorológicas y climáticas intra e interanuales, como lo muestran los trabajos de Ortega-Rosas *et al.* (2019; 2020), donde se observó una importante diferencia respecto a la InPA y a los periodos de mayor concentración polínica, se requieren más estudios aerobiológicos de la atmósfera que permitan conocer la composición y dinámica de estas biopartículas.

## **II. HIPÓTESIS**

La fenología floral está determinada fuertemente por patrones meteorológicos, y ambos definen el contenido polínico de la atmósfera. En consecuencia, si bien los tipos polínicos dominantes en 2018 se pueden predecir con base en estudios aerobiológicos de años anteriores, las concentraciones de estos y los demás taxa, así como su calendarización serán diferentes.

### **III. OBJETIVOS**

#### **III.1. Objetivo general**

Determinar el contenido de polen aerovagante en la atmósfera de Hermosillo, Sonora, en el año 2018, así como su relación con la fenología floral y las condiciones meteorológicas

#### **III.2. Objetivos específicos**

- Identificar los tipos polínicos presentes diariamente en la atmósfera de Hermosillo en el año 2018 y establecer las estaciones polínicas de los más abundantes.
- Determinar variaciones semidiurnas en las concentraciones de polen y su relación con factores meteorológicos.
- Establecer la fenología floral de especies nativas e introducidas de Hermosillo, Sonora.
- Determinar la correlación de datos aerobiológicos y meteorológicos.

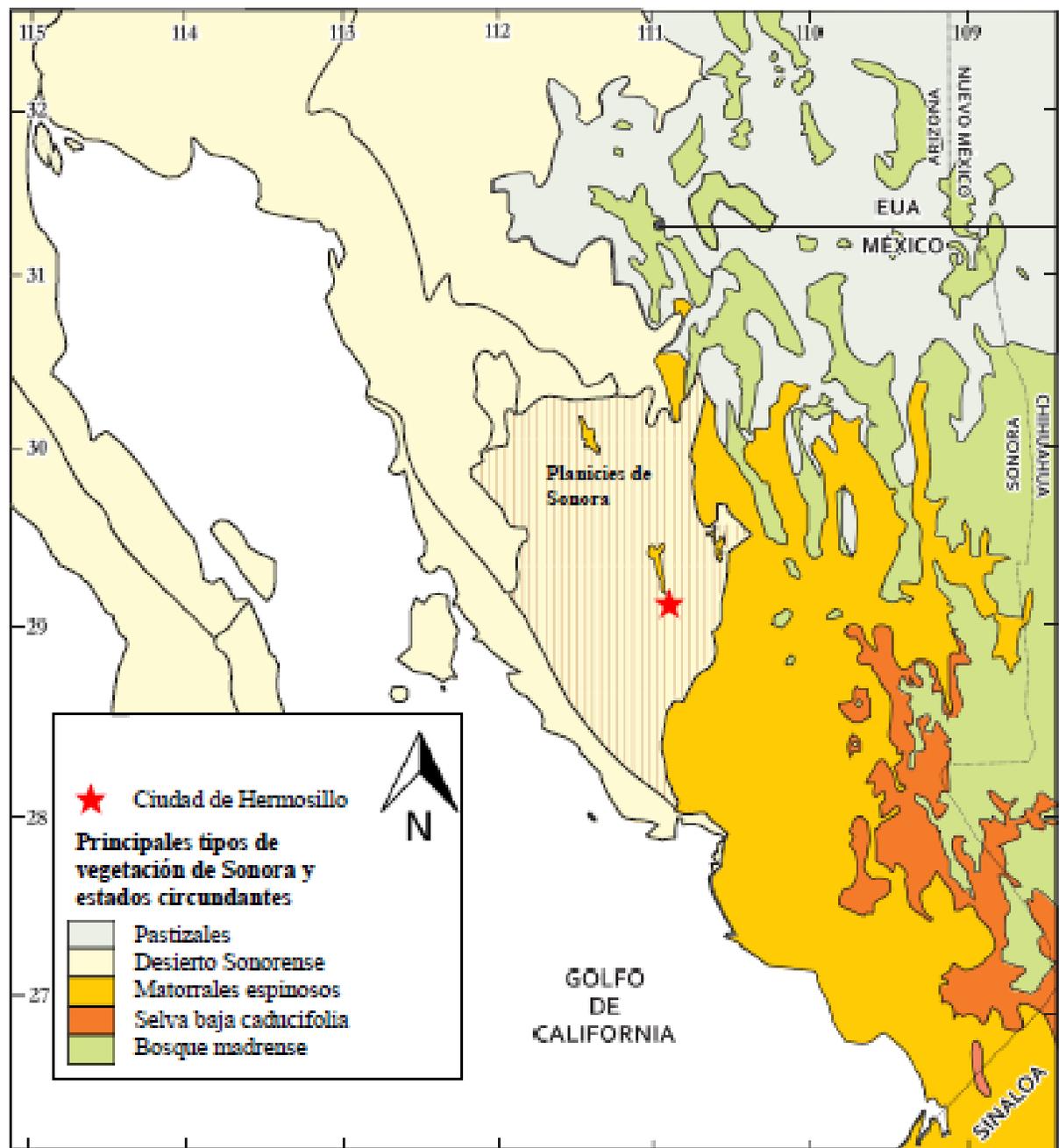
## IV. MATERIALES Y MÉTODOS

### IV.1. Descripción del área de estudio

La ciudad de Hermosillo ( $29^{\circ}04'53.8''\text{N}$ ,  $110^{\circ}58'09.6''\text{W}$ ) (**Figura 6**) se localiza en el centro-oeste del estado de Sonora, a una altitud de 200 msnm (INEGI, 2017) y cuenta con una población aproximada de 855,563 habitantes (INEGI, 2021). El territorio es principalmente llano con inclinación hacia el oeste, en dirección a la costa. Unas pocas elevaciones que no superan los 300 m rodean la ciudad, entre ellas el cerro El Bachoco al noreste y otros cerros de menor elevación hacia el noroeste, hacia el sur-sureste el Agualurca alcanza 600 m, y hacia el oeste, a 50 km, los Siete Cerros no llegan a alcanzar los 200 m.

La ciudad de Hermosillo se encuentra dentro de la subdivisión de Planicies del Desierto Sonorense. La mayor parte de la vegetación es de tipo matorral desértico y matorral espinoso y la otra parte es dedicada a la agricultura. Hacia el oeste de Hermosillo, siguiendo la ruta de la ciudad hacia Bahía de Kino, que se encuentra a una distancia de aproximadamente 100 km, se localiza una amplia extensión de campos agrícolas denominada la Costa de Hermosillo, donde se cultivan principalmente trigo, forrajes, garbanzo, uva y nuez (Hernández-Pérez, 2012).

Hermosillo posee un clima muy árido cálido (BWh), según la clasificación de Köppen (García, 1966). La temperatura media anual es de  $25.3^{\circ}\text{C}$ . En julio (mes más cálido) la temperatura media es de  $33^{\circ}\text{C}$  y en diciembre (mes más frío) la temperatura promedio es de  $16.8^{\circ}\text{C}$ . Los meses más secos son abril y mayo con un promedio de lluvia de 3.5 y 2.3 mm, mientras que julio y agosto son los de mayor precipitación. La precipitación media anual para la ciudad de Hermosillo es de 385.3 mm. En promedio, las precipitaciones de verano alcanzan 289.1 mm y las de invierno 57.3 mm (INEGI, 2017).



**Figura 6.** Ubicación de la ciudad de Hermosillo y distribución de los principales tipos de vegetación de Sonora, incluyendo al Desierto Sonorense y la subdivisión Planicies de Sonora (modificado de Martínez-Yrizar et al., 2010).

## IV.2. Metodología

### IV.2.1. Muestreo aerobiológico

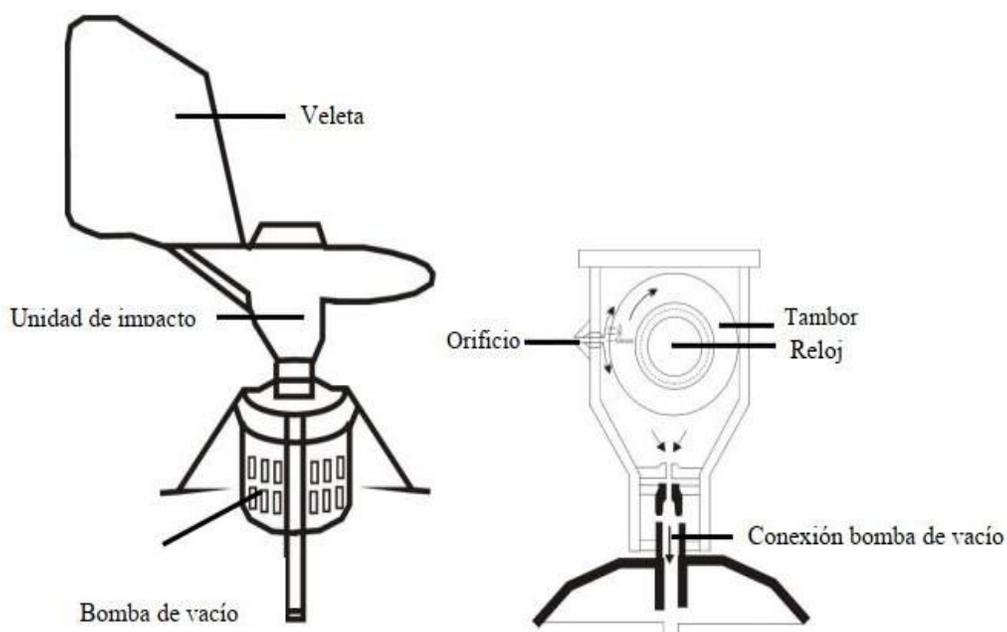
Las muestras analizadas en este trabajo corresponden a un muestreo aerobiológico que se llevó a cabo del 01/01/2018 al 31/12/2018 en la ciudad de Hermosillo, Sonora. Se obtuvieron muestras diarias de la atmósfera de Hermosillo durante todo el año (excepto días en los que se presentaron problemas relacionados con el equipo de muestreo). El método de muestreo utilizado fue el definido por la Red Española de Aerobiología, que utiliza de forma normalizada captadores de partículas volumétricos por succión, basados en el principio del impacto (Galán *et al.*, 2007). Para llevar a cabo el muestreo se utilizó un captador de partículas tipo Hirst modelo VPPS 2000 de Lanzoni s.r.l., Italia, que se encontraba ubicado en la azotea del edificio 7J (29°04'52.1"N 110°58'09.6"W) de la unidad regional centro de la Universidad de Sonora, a una altura de aproximadamente 10 m sobre el nivel del suelo (**Figura 7**).



**Figura 7.** Captador de partículas ubicado en la Universidad de Sonora.

#### IV.2.2. Captador de partículas tipo Hirst

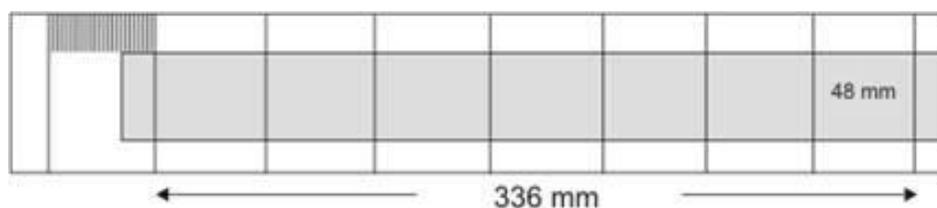
Los muestreadores tipo Hirst (**Figura 8**) constan de tres partes principales: veleta, unidad de impacto y bomba de vacío. La veleta permite que el orificio de entrada de las partículas se posicione en dirección a la llegada del viento. En la unidad de impacto se encuentra el orificio de entrada de las partículas, que tiene un tamaño de 14 x 2 mm y un reloj. Dentro de la unidad de impacto se coloca el tambor, encima del reloj, al cual hay que darle cuerda semanalmente para que permita la rotación del tambor. La velocidad de giro del tambor es de 2 mm/h. El tambor debe estar rodeado de cinta Melinex® impregnada con alguna sustancia que permita la adhesión de las partículas. (Galán *et al.*, 2007). Para este trabajo se utilizó vaselina como adhesivo. Una bomba de vacío permite la succión de un volumen de aire determinado, que puede ser regulado a partir de un sistema de ajuste. El caudal de succión ajustado para realizar el análisis de las partículas aerotransportadas en el aire es de 10 l/min (Galán *et al.*, 2007) y corresponde al volumen respiratorio humano, lo que permite asociar los datos a incidencias alérgicas.



**Figura 8.** Componentes de un captador de partículas tipo Hirst (tomado de Galán *et al.*, 2007).

### IV.2.3. Obtención y preparación de muestras aerobiológicas

El cambio de tambor y cinta Melinex® del captador de partículas se realizó cada siete días. La preparación de muestras aerobiológicas se llevó a cabo en el Laboratorio de Recursos Naturales Terrestres del DICTUS de la Universidad de Sonora. La cinta se colocó sobre una regla de metacrilato (**Figura 9**), la cual venía marcada con hendiduras cada 48 mm, con ello se obtuvieron fragmentos de cinta de 48 mm de longitud, correspondientes a 24 h de muestreo. Los fragmentos de cinta se colocaron en portaobjetos, se les añadieron 3 gotas de gelatina con fucsina para la tinción de los granos y se colocó el cubreobjetos.



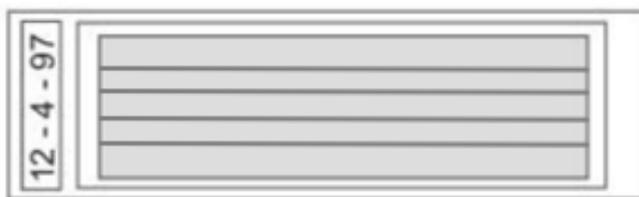
**Figura 9.** Cinta Melinex (en color gris) sobre regla de metacrilato (tomado de Galán et al., 2007)

### IV.2.4. Análisis de muestras aerobiológicas

La cinta colocada en el captador, que es desplazada por el reloj a una velocidad de 2 mm por hora, va atrapando las partículas succionadas por el captador de partículas, con lo cual es posible analizar las muestras de manera diaria u horaria. El análisis de muestras aerobiológicas se realizó al microscopio óptico a 400 aumentos, siguiendo la metodología de la Red Española de Aerobiología (Galán *et al.*, 2007). El método de recuento consta de cuatro barridos horizontales continuos a lo largo de la muestra (**Figura 10**). A lo largo de los barridos se anotan los tipos polínicos identificados y el número de granos por tipo polínico, de esta manera se obtienen datos diarios que se traducirán a concentraciones polínicas (Galán *et al.*, 2007). Los granos de polen contabilizados se identificaron taxonómicamente a partir de sus caracteres

morfológicos. La identificación se basó en atlas polínicos, bibliografía especializada y la colección polínica de referencia del Laboratorio de Recursos Naturales Terrestres. La determinación de los granos se llevó a cabo hasta el nivel taxonómico más preciso posible.

Para determinar variaciones semidiurnas se dividió la muestra en dos partes: de 00:00 a. m. - 11:59 a.m. y de 12:00 p.m. - 23:59 p.m. Se realizaron los cuatro barridos horizontales a 400 aumentos con el microscopio óptico y se anotaron los taxa y el número de granos para la mañana y la tarde por separado.



**Figura 10.** Método de recuento establecido por la Red Española de Aerobiología (tomado de Galán et al., 2007).

Los datos del análisis al microscopio óptico se multiplicaron por un factor de conversión para obtener la concentración polínica que se expresa como una medida diaria/semidiurna de granos de polen/m<sup>3</sup>. El factor de conversión toma en cuenta el volumen de succión del aire muestreado y la superficie del campo del microscopio utilizado, como se muestra a continuación.

*Concentración diaria:*

- Volumen de succión: 10 l / min, que equivale a 14.4 m<sup>3</sup> en un día
- Diámetro medio del campo de visión al microscopio: 0.45 mm
- Área de 1 barrido horizontal= 48 mm (largo de la muestra) x 0.45 mm (diámetro del campo de visión) = 21.6 mm<sup>2</sup>
- Superficie analizada = 21.6 x 4 barridos = 86.4 mm<sup>2</sup>
- Superficie total muestreada = 48 mm (largo de la muestra) x 14 mm (ancho de la muestra) = 672 mm<sup>2</sup>
- Contenido de partículas por metro cúbico de aire= (672 mm<sup>2</sup> / 86.4 mm<sup>2</sup>) x (1/14.4) x

granos de polen contados

- Contenido de partículas por metro cúbico de aire = granos de polen x .54

*Concentración semidiurna:*

- Volumen de succión: 10 l / min, que equivale a 7.2 m<sup>3</sup> en 12 h.
- Diámetro medio del campo de visión al microscopio: 0.45 mm
- Área de 1 barrido horizontal= 24 mm (largo de la mitad muestra) x 0.45 mm (diámetro del campo de visión) = 10.8 mm<sup>2</sup>
- Superficie analizada = 10.8 x 4 barridos = 43.2 mm<sup>2</sup>
- Superficie total muestreada = 24 mm (largo de la muestra) x 14 mm (ancho de la muestra) = 336 mm<sup>2</sup>
- Contenido de partículas por metro cúbico de aire= (336 mm<sup>2</sup> / 43.2 mm<sup>2</sup>) x (1/7.2) x granos de polen contados
- Contenido de partículas por metro cúbico de aire = granos de polen x 1.08

Así, la concentración diaria de polen se obtuvo multiplicando el número de granos de polen de un taxón x 0.54 y la concentración semidiurna multiplicando los granos de polen x 1.08. Una vez calculadas las concentraciones polínicas, se determinó la Integral Polínica Anual (InPA), definida como la suma de las concentraciones diarias durante un año (Galán *et al.*, 2017), así como también las Integrales Polínicas Mensuales (InPM).

#### **IV.2.5. Estaciones polínicas**

El inicio y el final de la estación polínica de los taxa más importantes se marcó como el día en que se alcanzó un recuento de granos de polen/m<sup>3</sup> específico (Velasco-Jiménez *et al.*, 2012). Dada la dinámica de ciertos taxa, se optó por establecer esa cifra en función de la concentración máxima diaria de cada tipo polínico. Ese valor correspondió al 5% de la concentración máxima diaria de cada tipo polínico. En algunos casos esa cifra resultó ser muy pequeña, por lo que, para evitar una mayor prolongación de la estación polínica se tomó en cuenta, para el inicio, que el valor apareciera en por lo menos tres días de la misma semana. El final de la estación se

determinó como el día donde se presentó por última vez la concentración igual o mayor a la calculada con el 5%, y que en los días siguientes la concentración estuviera por debajo de ese valor.

#### **IV.2.6. Meteorología, clima y análisis estadístico**

Se obtuvieron datos meteorológicos de precipitación (mm), temperatura mínima (°C), temperatura media (°C), temperatura máxima (°C), humedad relativa (%), radiación solar ( $W/m^2$ ), velocidad del viento (Km/h) y dirección del viento (°) de la ciudad de Hermosillo, en el año 2018, proporcionados por la Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas de Sonora, estación La Bachata (CESAVE – SIAFESON, 2020).

Las concentraciones de los tipos polínicos más importantes y los parámetros meteorológicos mencionados anteriormente se analizaron mediante estadística no paramétrica. Se realizaron correlaciones de Spearman usando una  $p < 0.05$ , en el programa estadístico PAST (PAleontological STatistics), para determinar el grado de correlación entre las variables meteorológicas y los tipos polínicos.

#### **IV.2.7. Retro-trayectorias de vientos**

Se realizaron retro-trayectorias de vientos a través del modelo matemático HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory, para determinar la procedencia de granos de polen extra-locales, ligados a eventos con grandes concentraciones. El modelo HYSPLIT es uno de los modelos de dispersión y transporte atmosférico más utilizados en las ciencias atmosféricas. Entre sus aplicaciones, una de las más comunes es, precisamente, el análisis de trayectoria inversa para determinar el origen de las masas de aire (Stein *et al.*, 2015).

Una vez realizadas las retro-trayectorias, se buscó la posible fuente de los granos de polen utilizando la herramienta Map Interface de la Red de Herbarios del Noroeste de México (<https://herbanwmex.net/portal/collections/map/index.php>). Esta herramienta despliega un mapa interactivo donde muestra las diversas localizaciones de un taxón, basándose en registros de observaciones y colecta de ejemplares de plantas de una especie, género o familia.

#### **IV.2.8. Floración**

Se registró la floración de especies nativas y exóticas dentro de la ciudad de Hermosillo, en el año 2018. El seguimiento se llevó a cabo mediante la observación semanal de plantas que se encontraban en flor dentro de un radio de aproximadamente 2 km del captador de partículas, siguiendo un recorrido a lo largo de las calles y cubriendo la vegetación de aceras de calles, parques y fachadas de las casas. Con los datos obtenidos se elaboró un calendario de floración urbana para el año 2018. Se realizaron correlaciones de Spearman con los datos de floración y los datos de concentraciones polínicas.

#### **IV.2.9. Listado de vegetación nativa del área urbana de Hermosillo**

Con la ayuda de la herramienta Listados Dinámicos de la página web de la Red de Herbarios del Noroeste de México (<https://herbanwmex.net/portal/checklists/dynamicmap.php?interface=checklist>), se realizó una revisión de las especies de flora nativa presentes en el área urbana en un radio de 5 km alrededor del punto de muestreo. Esta herramienta se basa en registros de ejemplares de herbario de especies de plantas recolectadas dentro de un área geográfica definida. Con ella es posible ubicarse en un punto específico del mapa y elegir un radio determinado (km o millas) para conocer los taxa de esa área.

#### **IV.2.10. Diversidad polínica**

Se determinó la diversidad polínica de la atmósfera de Hermosillo. Se obtuvo la riqueza, la cual se define como el número de especies (tipos polínicos) detectados en un muestreo (Carmona y Carmona, 2013), y con la ayuda del programa estadístico PAST se calculó el Índice de Shannon ( $H'$ ) (Shannon y Weaver, 1949) y la Equitatividad ( $J$ ); además, se calculó la diversidad máxima ( $H_{\max}$ ) con  $\ln S$ , siendo  $S$  el número de tipos polínicos registrados por mes. Para este estudio se consideró como diversidad baja cuando el valor del Índice de Shannon fue menor a 2 y alta cuando fue superior a este valor. También se realizó una correlación de Spearman con los

parámetros meteorológicos para establecer si alguna variable meteorológica tenía efecto sobre la diversidad.

El Índice de Shannon ( $H'$ ) refleja la heterogeneidad de una comunidad con base en dos factores: el número de especies/ tipos polínicos ( $S$ ) y su abundancia relativa. El índice muestra el grado de incertidumbre al seleccionar aleatoriamente un individuo dentro de una comunidad. La diversidad máxima ( $H_{\text{máx}}$ ) se alcanza cuando todas las especies/ tipos polínicos están igualmente presentes (Pla, 2006). El valor de  $H$  aumenta cuando hay un aumento de la riqueza de especies, y/o un aumento en la equitatividad de la representación de la abundancia relativa de las especies. El índice por sí solo no es capaz de determinar a cuál de los factores se debe el aumento o cambio en su valor, por lo cual, en análisis de este tipo suele incluirse además del Índice de Shannon, a la riqueza de especies y la Equitatividad (Carmona y Carmona, 2013).

## V. RESULTADOS

### V.1. Listado de vegetación nativa dentro del área urbana de Hermosillo

En un radio de 5 km alrededor del equipo de muestreo la riqueza encontrada fue de 176 especies, distribuidas dentro de 126 géneros y 38 familias. Las familias con mayor número de especies fueron Poaceae con 26, Fabaceae con 24, Asteraceae con 21, Euphorbiaceae con 11, Cactaceae con 9 y Amaranthaceae con 8 (Red de Herbarios del Noroeste de México, 2020) (Tabla 2).

**Tabla 2.** Listado de especies nativas en un radio de 5 km alrededor del captador de partículas, obtenido mediante la Red de Herbarios del Noroeste de México.

Familia	Especie	Familia	Especie
Acanthaceae	<i>Carlowrightia arizonica</i>	Fabaceae	<i>Caesalpinia palmeri</i>
	<i>Holographis virgata</i>		<i>Caesalpinia pulcherrima</i>
Achatocarpaceae	<i>Phaulothamnus spinescens</i>		<i>Coursetia glandulosa</i>
Amaranthaceae	<i>Amaranthus fimbriatus</i>		<i>Desmanthus covillei</i>
	<i>Amaranthus palmeri</i>		<i>Desmodium neomexicanum</i>
	<i>Atriplex canescens</i>		<i>Lysiloma watsonii</i>
	<i>Atriplex elegans</i>		<i>Marina parryi</i>
	<i>Blitum nuttallianum</i>		<i>Melilotus albus</i>
	<i>Chenopodium murale</i>		<i>Melilotus indicus</i>
	<i>Salsola tragus</i>		<i>Mimosa distachya</i>
	<i>Tidestromia lanuginosa</i>		<i>Olnya tesota</i>
Apocynaceae	<i>Asclepias subulata</i>		<i>Parkinsonia aculeata</i>
	<i>Funastrum cynanchoides</i>		<i>Parkinsonia florida</i>
	<i>Funastrum heterophyllum</i>		<i>Parkinsonia microphylla</i>
	<i>Nerium oleander</i>		<i>Pithecellobium dulce</i>
	<i>Polystemma cordifolium</i>		<i>Poincianella arida</i>
	<i>Vallesia glabra</i>		<i>Prosopis articulata</i>
Asparagaceae	<i>Agave americana</i>		<i>Prosopis velutina</i>
	<i>Agave angustifolia</i>		<i>Senna covesii</i>

	<i>Agave colorata</i>		<i>Vachellia campechiana</i>
	<i>Agave desmettiana</i>		<i>Vachellia farnesiana</i>
	<i>Hesperaloe parviflora</i>	Fouquieriaceae	<i>Fouquieria macdougalii</i>
Asteraceae	<i>Ambrosia ambrosioides</i>		<i>Fouquieria splendens</i>
	<i>Ambrosia confertiflora</i>	Lamiaceae	<i>Hedeoma nana</i>
	<i>Ambrosia monogyra</i>	Loasaceae	<i>Mentzelia aspera</i>
	<i>Baccharis salicifolia</i>		<u><i>Mentzelia multiflora</i></u>
	<i>Baccharis sarothroides</i>	Malpighiaceae	<i>Callaeum macropterum</i>
	<i>Bebbia juncea</i>	Malvaceae	<i>Abutilon incanum</i>
	<i>Bidens aurea</i>		<i>Ayenia filiformis</i>
	<i>Bidens pilosa</i>		<i>Malva parviflora</i>
	<i>Brickellia coulteri</i>		<i>Malvastrum coromandelianum</i>
	<i>Encelia farinosa</i>		<i>Melochia pyramidata</i>
	<i>Helianthus annuus</i>		<i>Sida abutilifolia</i>
	<i>Oncosiphon pilulifer</i>		<i>Sphaeralcea coulteri</i>
	<i>Pectis coulteri</i>	Menispermaceae	<i>Cocculus diversifolius</i>
	<i>Pectis linifolia</i>	Moraceae	<i>Ficus benjamina</i>
	<i>Pectis rusbyi</i>	Nyctaginaceae	<i>Allionia incarnata</i>
	<i>Perityle leptoglossa</i>		<i>Boerhavia coccinea</i>
	<i>Perityle lobata</i>		<i>Boerhavia diffusa</i>
	<i>Perityle microglossa</i>		<i>Commicarpus scandens</i>
	<i>Stephanomeria pauciflora</i>	Onagraceae	<i>Ludwigia octovalvis</i>
	<i>Thymophylla concinna</i>		<i>Oenothera curtiflora</i>
	<i>Verbesina encelioides</i>	Plantaginaceae	<i>Veronica peregrina</i>
Boraginaceae	<i>Cordia parvifolia</i>	Poaceae	<i>Aristida adscensionis</i>
	<i>Heliotropium wigginsii</i>		<i>Aristida ternipes</i>
	<i>Johnstonella angustifolia</i>		<i>Bouteloua aristidoides</i>
	<i>Nama hispida</i>		<i>Bouteloua barbata</i>
	<i>Nama torynophyllum</i>		<i>Bouteloua curtipendula</i>
Brassicaceae	<i>Brassica nigra</i>		<i>Bouteloua diversispicula</i>
	<i>Brassica tournefortii</i>		<i>Bouteloua hirsuta</i>

	<i>Lepidium lasiocarpum</i>		<i>Cenchrus advena</i>
	<i>Sisymbrium irio</i>		<i>Cenchrus echinatus</i>
Burseraceae	<i>Bursera fagaroides</i>		<i>Cenchrus spinifex</i>
	<i>Bursera laxiflora</i>		<i>Chloris barbata</i>
	<i>Bursera microphylla</i>		<i>Chloris inflata</i>
Cactaceae	<i>Carnegiea gigantea</i>		<i>Chloris virgata</i>
	<i>Cylindropuntia fulgida</i>		<i>Cottea pappophoroides</i>
	<i>Cylindropuntia leptocaulis</i>		<i>Cynodon dactylon</i>
	<i>Cylindropuntia versicolor</i>		<i>Dactyloctenium aegyptium</i>
	<i>Ferocactus emoryi</i>		<i>Dasyochloa pulchella</i>
	<i>Mammillaria grahamii</i>		<i>Dinebra panicea</i>
	<i>Opuntia gosseliniana</i>		<i>Echinochloa colona</i>
	<i>Pachycereus schottii</i>		<i>Eragrostis cilianensis</i>
	<i>Stenocereus thurberi</i>		<i>Eragrostis pectinacea</i>
Cannabaceae	<i>Celtis pallida</i>		<i>Heteropogon contortus</i>
Cleomaceae	<i>Arivela viscosa</i>		<i>Lycurus setosus</i>
	<i>Cleome tenuis</i>		<i>Pennisetum ciliare</i>
Commelinaceae	<i>Commelina erecta</i>		<i>Setaria adhaerens</i>
Convolvulaceae	<i>Cuscuta umbellata</i>		<i>Urochloa arizonica</i>
	<i>Ipomoea carnea</i>	Polygonaceae	<i>Polygonum argyrocoleon</i>
	<i>Ipomoea ternifolia</i>		<i>Rumex dentatus</i>
Cucurbitaceae	<i>Tumamoca macdougalii</i>	Primulaceae	<i>Bonellia macrocarpa</i>
Cyperaceae	<i>Cyperus elegans</i>	Resedaceae	<i>Oligomeris linifolia</i>
	<i>Cyperus rotundus</i>	Rhamnaceae	<i>Karwinskia humboldtiana</i>
Euphorbiaceae	<i>Acalypha californica</i>		<i>Ziziphus obtusifolia</i>
	<i>Adelia obovata</i>	Sapindaceae	<i>Cardiospermum corindum</i>
	<i>Chamaesyce gracillima</i>	Solanaceae	<i>Datura discolor</i>
	<i>Chamaesyce hyssopifolia</i>		<i>Lycium andersonii</i>
	<i>Croton sonora</i>		<i>Lycium berlandieri</i>
	<i>Ditaxis serrata</i>		<i>Lycium fremontii</i>
	<i>Euphorbia californica</i>		<i>Lycium macrodon</i>

	<i>Euphorbia eriantha</i>		<i>Nicotiana obtusifolia</i>
	<i>Euphorbia graminea</i>		<i>Solanum elaeagnifolium</i>
	<i>Jatropha cardiophylla</i>	Stegnospermataceae	<i>Stegnosperma halimifolium</i>
	<i>Jatropha cordata</i>	Verbenaceae	<i>Verbena halei</i>
Fabaceae	<i>Acacia constricta</i>	Zygophyllaceae	<i>Guaiacum coulteri</i>
	<i>Acacia farnesiana</i>		<i>Kallstroemia grandiflora</i>
	<i>Acacia willardiana</i>		<i>Larrea tridentata</i>

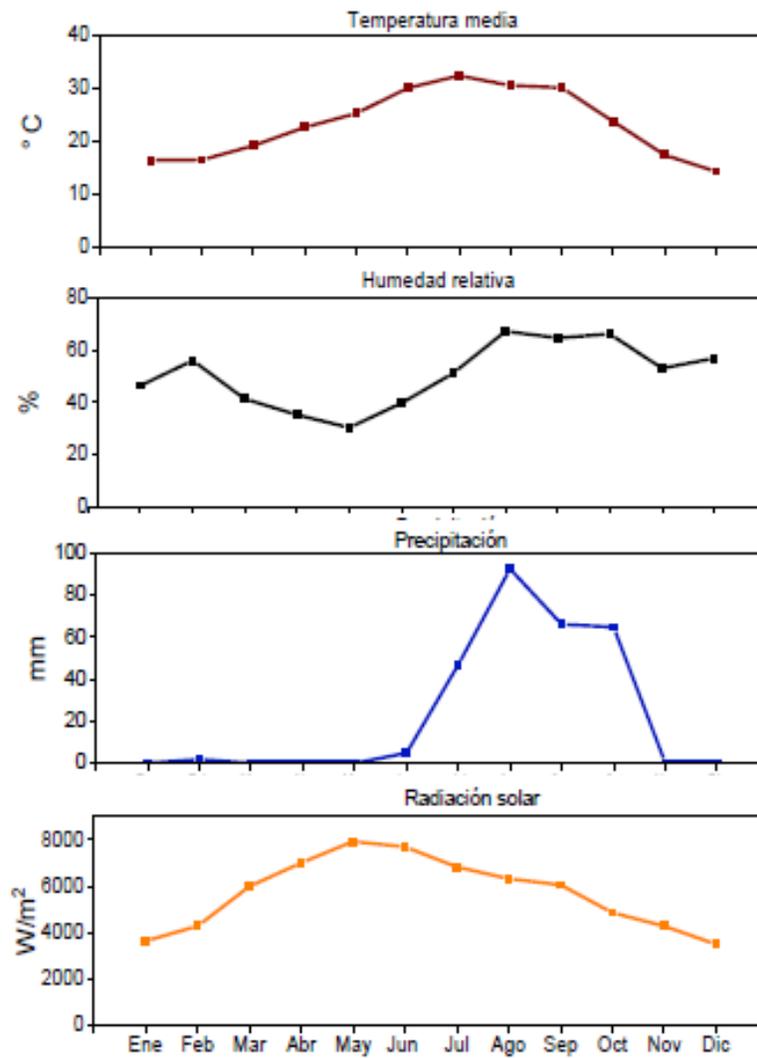
## V.2. Meteorología

Se obtuvieron datos meteorológicos de la ciudad de Hermosillo. En la Tabla 3 se muestran los promedios de los parámetros meteorológicos, así como el acumulado de precipitaciones mensuales. Para ese año la temperatura media fue de 23.2 °C, la humedad relativa de 50.5 % y la precipitación acumulada fue de 276.2 mm.

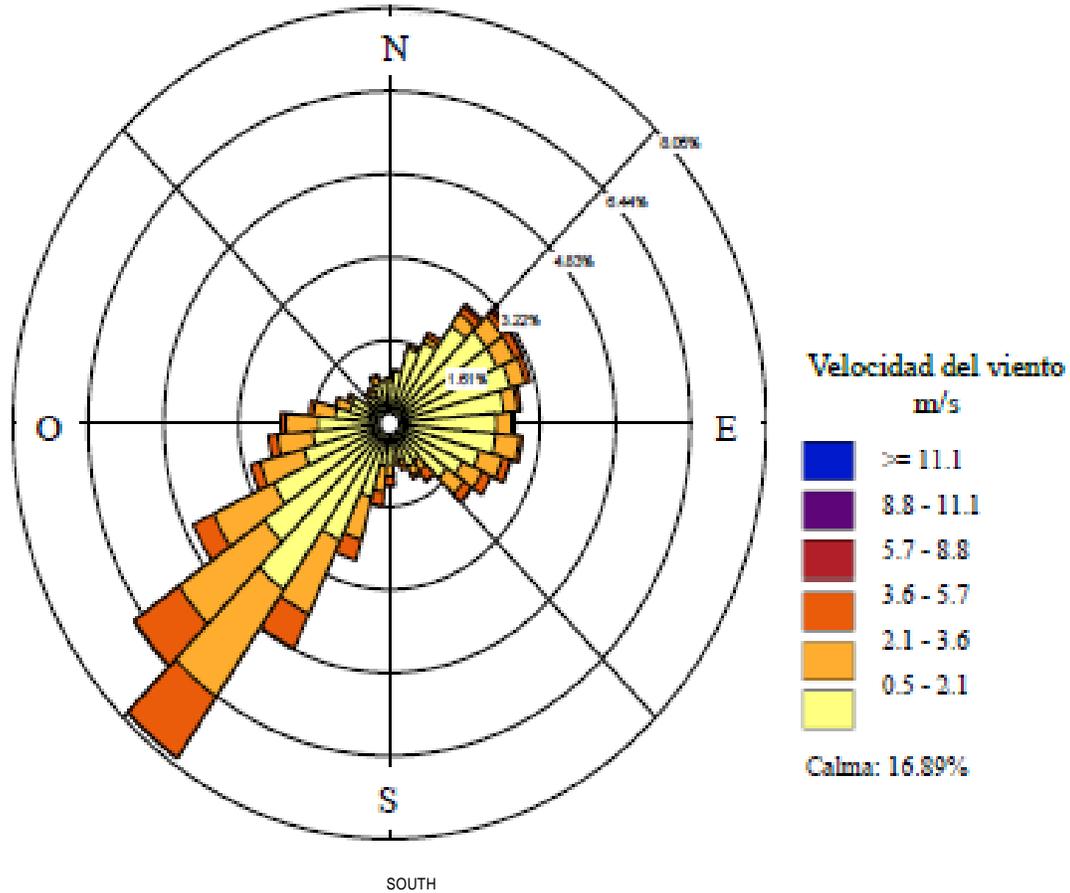
**Tabla 3.** Parámetros meteorológicos obtenidos en la ciudad de Hermosillo, en 2018 (CESAVE-SIAFESON, 2020).

	Temperatura (C°)			Humedad relativa (%)	Precipitación (mm)	Radiación solar (W/m <sup>2</sup> )	Velocidad del viento (Km/h)
	promedio	máxima	mínima				
Ene	16.4	17.7	15.3	46.3	0	3641	3.9
Feb	16.5	17.6	15.5	55.9	1.8	4288	4.4
Mar	19.3	20.5	18.0	41.2	0	5990	4.7
Abr	22.7	24.1	21.4	35.2	0	7016	5.6
May	25.3	26.6	24.1	30.3	0	7930	5.6
Jun	30.2	31.2	29.2	39.6	4.8	7699	6.8
Jul	32.5	33.3	31.7	51.1	46.7	6829	6.9
Ago	30.6	31.4	30.0	67.1	92.3	6326	6.2
Sep	30.2	31.0	29.4	64.5	65.9	6061	5.7
Oct	23.7	24.5	23.0	66.0	64.7	4862	4.9
Nov	17.5	18.5	16.4	52.9	0	4280	4.1
Dic	14.3	15.3	13.3	56.7	0	3500	4.0

En el 2018 el periodo de lluvias se presentó de junio a octubre, siendo el mes de agosto el más intenso (92.3 mm). En febrero hubo una precipitación acumulada de 1.8 mm. Los meses más secos del año fueron abril (35.2 % de humedad relativa promedio) y mayo (30.3 %), mientras que los meses más húmedos fueron agosto (67.1 %), septiembre (64.5 %) y octubre (66 %). Mayo ( $7930 \text{ W/m}^2$ ) y junio ( $7699 \text{ W/m}^2$ ) fueron los meses de mayor radiación solar, y diciembre ( $3500 \text{ W/m}^2$ ) y enero ( $3641 \text{ W/m}^2$ ) los de menor radiación, así como también los más fríos del año (14.3 y  $16.4 \text{ }^\circ\text{C}$  de temperatura media, respectivamente). Los meses más calurosos fueron julio ( $32.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) y agosto ( $30.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ). La velocidad del viento promedio osciló entre los 3.9 y 6.9 Km/h (1.08 y 1.91 m/s), mientras que la dirección predominante del viento fue del sur y suroeste (**Figura 12**).



**Figura 11.** Variaciones mensuales de la temperatura media, humedad relativa, precipitación y radiación solar en la ciudad de Hermosillo, en 2018.



**Figura 12.** Rosa de los vientos de la ciudad de Hermosillo, en 2018.

### V.3. Polen atmosférico

Se analizaron muestras aerobiológicas de 328 días del año 2018. A lo largo del año se presentaron algunos problemas técnicos relacionados con el equipo de muestreo, por lo cual no se pudieron obtener muestras del año completo. Se identificaron 88 tipos polínicos presentes en la atmósfera de la ciudad de Hermosillo, en el año 2018 (**Tabla 4**). La Integral Polínica Anual (InPA) fue de 19,841 polen \* día/m<sup>3</sup>.

El espectro polínico de la ciudad registró la presencia de 37 taxa nativos de Hermosillo que se distribuyen en un radio de 5 km del captador de partículas (**Tabla 5**). Entre ellos, tipos

polínicos de dispersión zoófila como *Agave*, *Bursera*, *Guaiacum coulteri*, *Larrea tridentata*, *Olneya tesota*, *Parkinsonia* y *Prosopis*, taxa característicos del Desierto Sonorense.

**Tabla 4.** Contenido polínico anual de la atmósfera de Hermosillo, Sonora, en el año 2018.

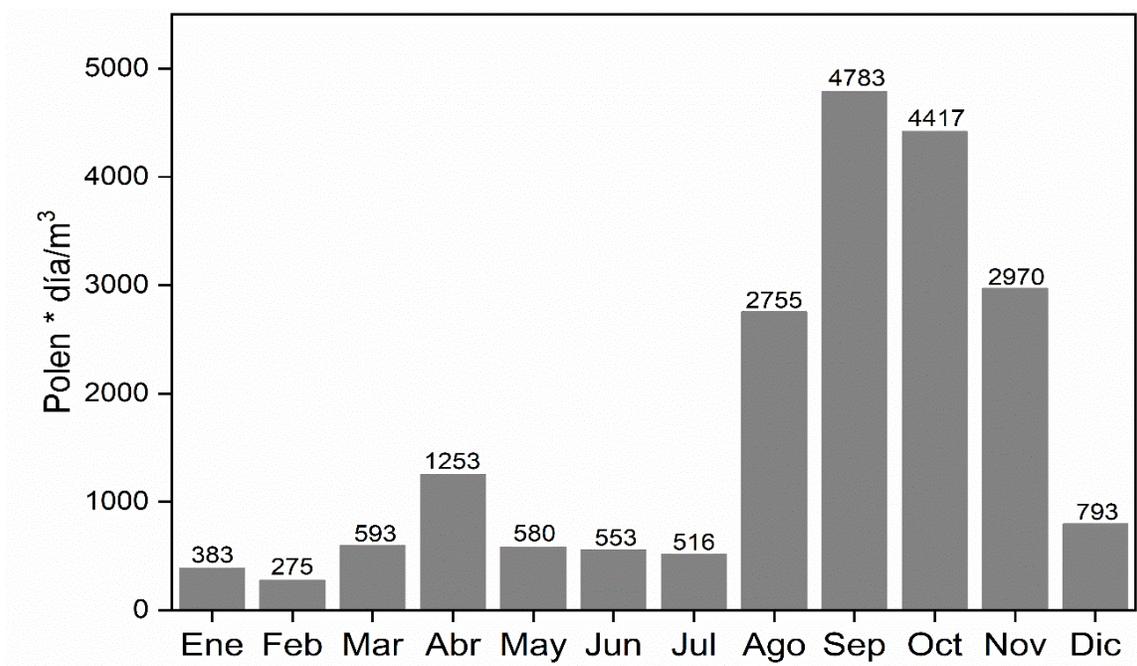
Tipo polínico	Granos de polen/m <sup>3</sup>	% InPA	Tipo polínico	Granos de polen/m <sup>3</sup>	% InPA
<i>Acalypha</i>	226	1.1	Malpighiaceae	79	0.4
Tipo <i>Acacia</i>	4	0.0	<i>Marina parryi</i>	3	0.0
<i>Agave</i>	1	0.0	<i>Medicago</i>	2	0.0
<i>Alnus</i>	6	0.0	Meliaceae	1	0.0
Amaranthaceae	6697	33.8	<i>Mimosa</i>	35	0.2
<i>Ambrosia</i>	879	4.4	Moraceae	62	0.3
Anacardiaceae	1	0.0	<i>Moringa oleifera</i>	8	0.0
Apiaceae	1	0.0	Myrtaceae	10	0.0
Arecaceae	3	0.0	<i>Nama hispida</i>	3	0.0
<i>Artemisia</i>	25	0.1	<i>Nerium oleander</i>	3	0.0
Asteraceae	151	0.8	<i>Olea europaea</i>	1	0.0
<i>Azadirachta indica</i>	3	0.0	<i>Olneya tesota</i>	26	0.1
Bignoniaceae	1	0.0	<i>Parkinsonia</i>	169	0.9
Tipo <i>Boerhavia</i>	1	0.0	<i>Pelargonium hortorum</i>	1	0.0
Boraginaceae	1	0.0	<i>Phoenix dactylifera</i>	15	0.1
<i>Bucida buceras</i>	239	1.2	<i>Phoenix roebelenii</i>	275	1.4
<i>Bursera</i>	89	0.4	<i>Physalis</i>	16	0.1
<i>Bursera laxiflora</i>	7	0.0	<i>Pinus</i>	89	0.4
<i>Bursera microphylla</i>	88	0.4	<i>Pithecellobium dulce</i>	1	0.0
<i>Caesalpinia</i>	2	0.0	<i>Plantago</i>	2	0.0
Cannabaceae	13	0.1	<i>Platanus</i>	11	0.1
<i>Carya illinoensis</i>	38	0.2	Poaceae	7833	39.5
<i>Cassia fistula</i>	3	0.0	<i>Populus</i>	11	0.1
<i>Casuarina equisetifolia</i>	73	0.4	<i>Prosopis</i>	364	1.8
<i>Ceiba pentandra</i>	2	0.0	<i>Punica granatum</i>	9	0.0

<i>Celtis</i>	139	0.7	<i>Quercus</i>	56	0.3
<i>Citrus</i>	27	0.1	<i>Rhus</i>	2	0.0
Crassulaceae	2	0.0	<i>Ricinus communis</i>	7	0.0
Cupressaceae	552	2.8	Rosaceae	23	0.1
<i>Cuscuta</i>	1	0.0	Tipo <i>Rumex</i>	2	0.0
Cyperaceae	5	0.0	<i>Salix</i>	11	0.1
<i>Dioon</i>	1	0.0	Scrophulariaceae	9	0.0
<i>Dodonaea viscosa</i>	29	0.1	Tipo <i>Senna</i>	2	0.0
<i>Ehretia tinifolia</i>	11	0.1	Solanaceae	6	0.0
<i>Euphorbia</i>	68	0.3	<i>Spathodea campanulata</i>	1	0.0
Euphorbiaceae	38	0.2	<i>Tabebuia</i>	2	0.0
Fabaceae	246	1.2	<i>Tamarix</i>	28	0.1
<i>Fraxinus</i>	16	0.1	<i>Thevetia peruviana</i>	1	0.0
<i>Guaiacum coulteri</i>	12	0.1	<i>Tidestromia</i>	75	0.4
Lamiaceae	2	0.0	<i>Typha domingensis</i>	9	0.0
<i>Larrea tridentata</i>	51	0.3	Urticaceae	11	0.1
<i>Leucaena leucocephala</i>	1	0.0	<i>Washingtonia</i>	103	0.5
<i>Leucophyllum frutescens</i>	7	0.0	Zygophyllaceae	1	0.0
Tipo Liliaceae	2	0.0	Indeterminables	263	1.3
Tipo <i>Lythrum</i>	9	0.0	Indeterminados	447	2.3

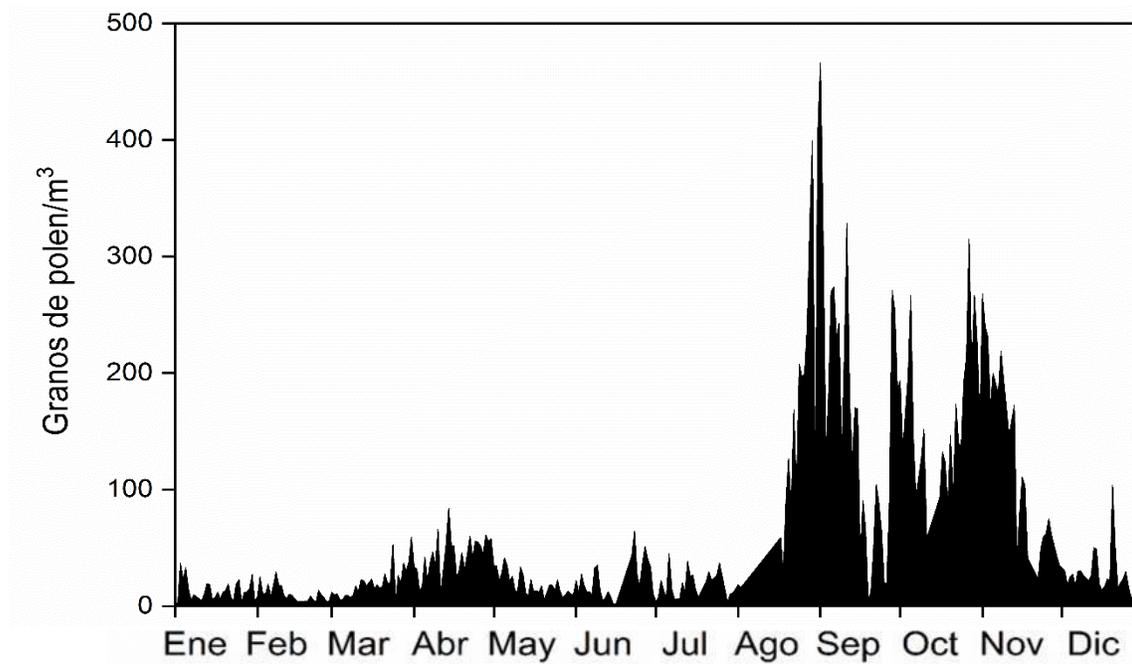
**Tabla 5.** Taxa nativos registrados en la atmósfera de Hermosillo.

	<b>Taxa</b>
Amaranthaceae	<i>Caesalpinia</i>
Asteraceae	<i>Celtis</i>
Boraginaceae	<i>Cuscuta</i>
Cyperaceae	<i>Euphorbia</i>
Euphorbiaceae	<i>Guaiacum coulteri</i>
Fabaceae	<i>Larrea tridentata</i>
Lamiaceae	<i>Marina parryi</i>
Moraceae	<i>Medicago</i>
Poaceae	<i>Mimosa</i>
Solanaceae	<i>Nama hispida</i>
Zygophyllaceae	<i>Olneya tesota</i>
<i>Acalypha californica</i>	<i>Parkinsonia</i>
<i>Acacia</i>	<i>Pithecellobium dulce</i>
<i>Agave</i>	<i>Prosopis</i>
<i>Boerhavia</i>	<i>Rumex</i>
<i>Bursera</i>	<i>Senna</i>
<i>Bursera laxiflora</i>	<i>Tidestromia</i>
<i>Bursera microphylla</i>	

En el 2018 se presentaron dos temporadas de concentraciones polínicas elevadas. La primera se presentó en primavera, centrada principalmente en el mes de abril, y la segunda, y más intensa, se presentó desde la segunda mitad de agosto hasta la segunda mitad de noviembre (**Figura 13**). En los meses de septiembre (4,783 polen \* día/m<sup>3</sup>) y octubre (4,417 polen \* día/m<sup>3</sup>) se dio el mayor aporte de granos de polen a la atmósfera de Hermosillo, mientras que los meses de enero (383 polen \* día/m<sup>3</sup>) y febrero (275 polen \* día/m<sup>3</sup>) fueron los que tuvieron menos aporte de granos (**Figura 14**).



**Figura 13.** Integrales Polínicas Mensuales de la atmósfera de Hermosillo, Sonora, en el 2018.



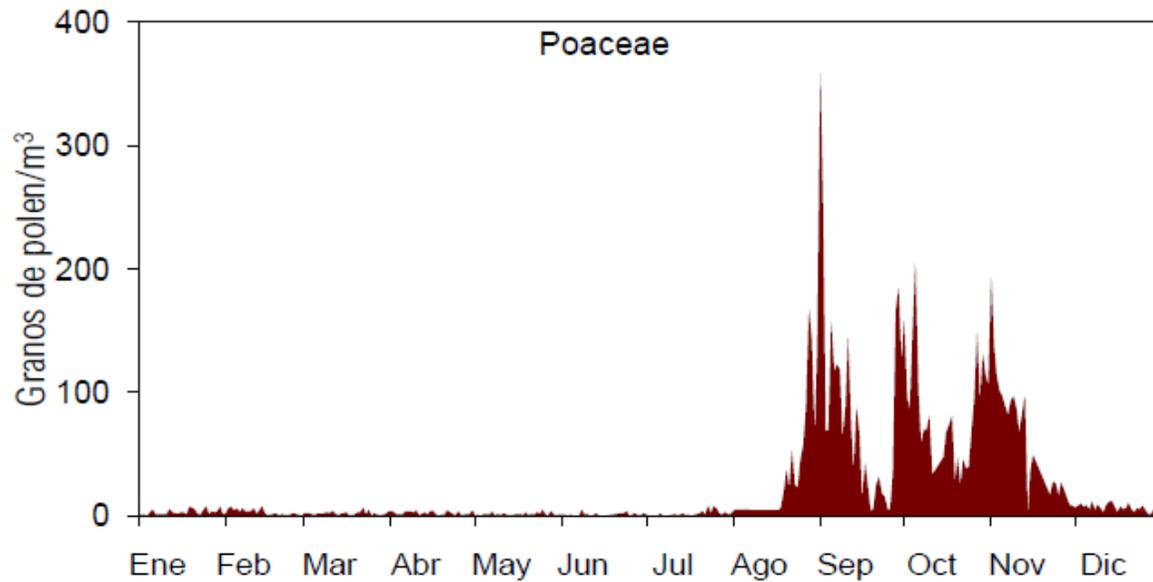
**Figura 14.** Dinámica anual de la concentración polínica diaria en la atmósfera de Hermosillo, Sonora, en 2018

Los días 29/08/2018, 31/08/2018 y 01/09/2018 registraron las concentraciones diarias máximas de 399, 404 y 466 granos de polen/m<sup>3</sup>, respectivamente. Las concentraciones diarias mínimas fueron de 2 y 3 granos de polen/m<sup>3</sup>, correspondientes a los días 02/01/2018, 26/01/2018, 23/02/2018, 15/06/2018, 16/06/2018 y 28/07/2018.

### V.3.1. Principales tipos polínicos de la atmósfera

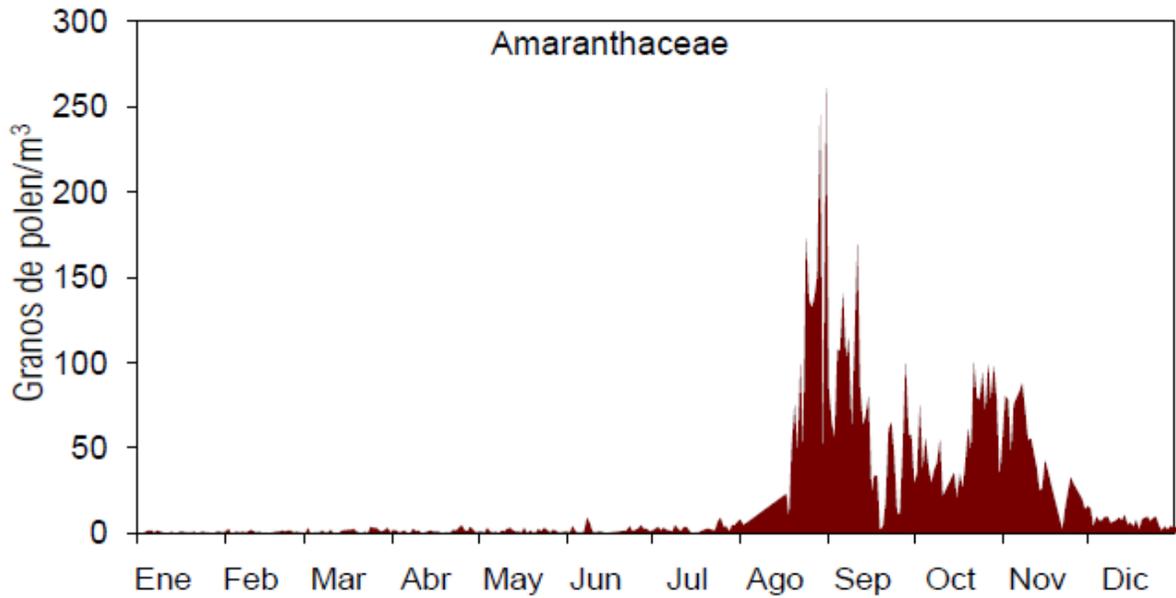
Los tipos polínicos más importantes, por su abundancia en la atmósfera fueron: Poaceae, Amaranthaceae, *Ambrosia* y Cupressaceae, representando más del 80% de la InPA. Otros tipos polínicos como: *Acalypha*, Asteraceae, *Bucida buceras*, Fabaceae, *Parkinsonia*, *Phoenix roebelenii* y *Prosopis* también tuvieron una contribución importante a la InPA. A continuación, se describe con más detalle el comportamiento de los cuatro tipos polínicos más abundantes a lo largo del 2018, y además se muestra la dinámica de otros taxa importantes como *Bucida buceras*, *Parkinsonia*, *Phoenix roebelenii* y *Prosopis*.

Poaceae se encontró presente en la atmósfera a lo largo de casi todo el año, apareciendo en 305 de los 328 días contabilizados. Por lo general, presentó concentraciones menores a 10 granos de polen/m<sup>3</sup>. En los meses de agosto a noviembre se registraron las concentraciones más altas de este tipo polínico. Específicamente, la estación de este taxón se presentó del 19/08/2018 al 28/11/2018, con una duración de 101 días (**Tabla 6**). Las concentraciones más elevadas de Poaceae se presentaron los días 01/09/2018, 02/09/2018 y 05/10/2018, alcanzando 359, 256 y 204 granos de polen/m<sup>3</sup>, respectivamente (**Figura 15**).



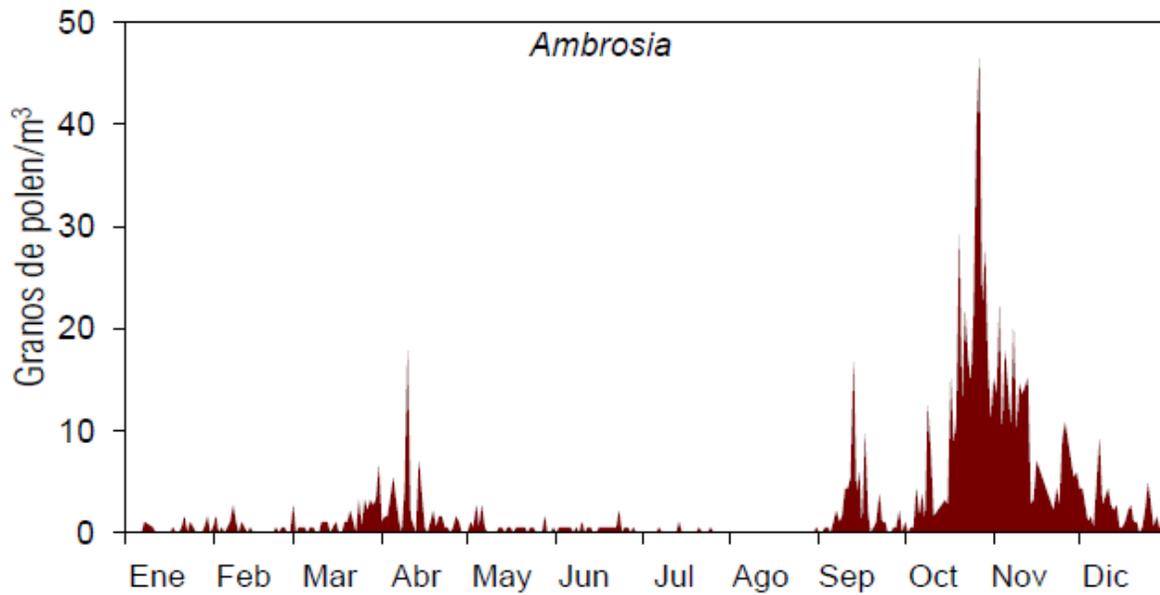
**Figura 15.** Dinámica anual de la concentración diaria de granos de polen de la familia Poaceae en la atmósfera de Hermosillo, Sonora, en el año 2018.

Amaranthaceae, al igual que Poaceae, se encontró presente en la atmósfera la mayor parte del 2018. Se registró polen de Amaranthaceae en 303 días del año, 233 de ellos con concentraciones menores a 10 granos de polen/m<sup>3</sup>. La estación de Amaranthaceae dio inicio el 19/08/2018 y finalizó el 03/12/2018, tuvo una duración de 106 días. En las fechas 29/08/2018 y 31/08/2018 se registraron concentraciones diarias máximas de 245 y 261 granos de polen/m<sup>3</sup>, respectivamente (**Figura 16**).



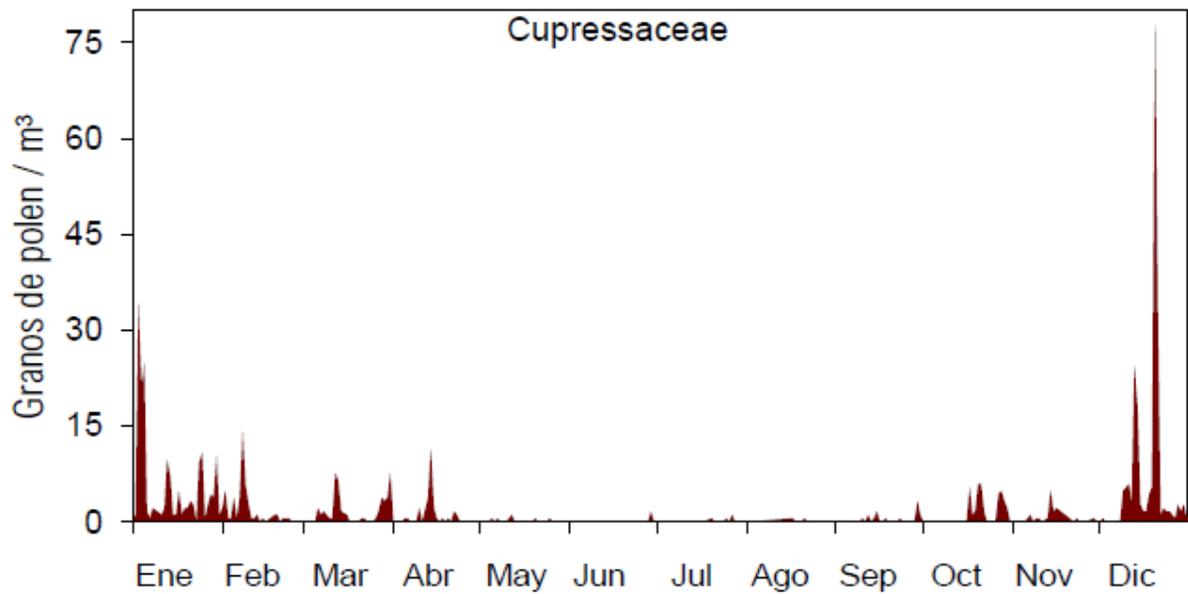
**Figura 16.** Dinámica anual de la concentración diaria de granos de polen de la familia Amaranthaceae en la atmósfera de Hermosillo, Sonora, en el año 2018

El polen de *Ambrosia* apareció en 207 días del año, mayormente en concentraciones mínimas y presentó dos estaciones polínicas. La primera estación comenzó el 26/03/2018 y finalizó el 28/04/2018, con una duración de 33 días. La segunda, y más intensa, se presentó del 09/09/2018 hasta el 29/12/2018 y tuvo una duración de 111 días. En abril se presentó una concentración máxima diaria de 18 granos de polen/m<sup>3</sup>. Por otra parte, los días 21/10/2018, 26/10/2018 y 27/10/2018 registraron las concentraciones diarias máximas del año, alcanzando valores de 29,40 y 46 granos de polen/m<sup>3</sup>, respectivamente (**Figura 17**).



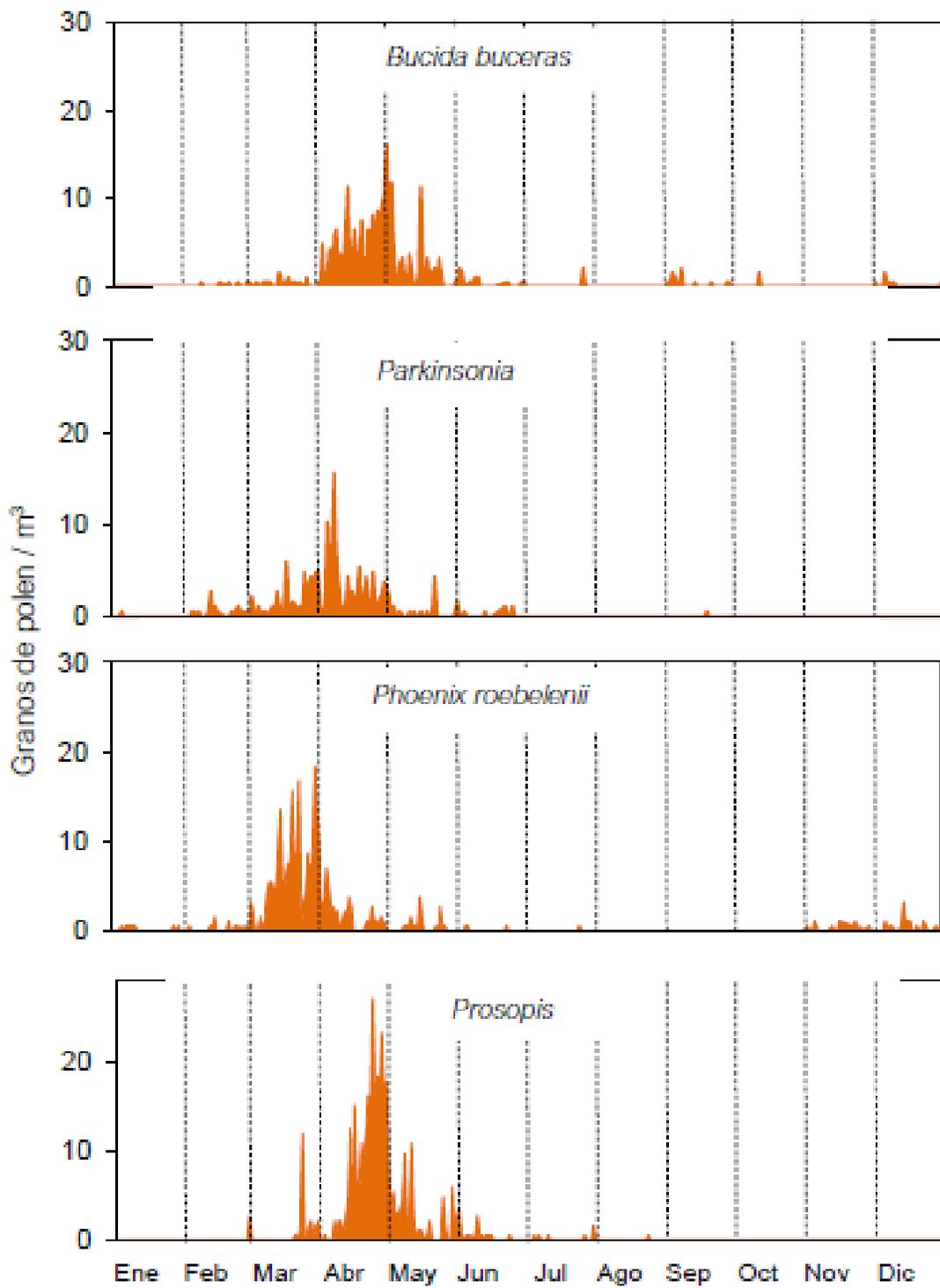
**Figura 17.** Dinámica anual de la concentración diaria de granos de polen de Ambrosia en la atmósfera de Hermosillo, Sonora, en 2018

El polen de Cupressaceae se registró en la atmósfera de Hermosillo en 140 días del año, la mayor parte de estos días con concentraciones menores a 5 granos de polen/m<sup>3</sup>, mientras que en los días 03/01/2018, 20/12/2018 y 21/12/2018 se registraron picos de concentraciones de 34, 78 y 33 granos de polen/m<sup>3</sup>, respectivamente (**Figura 18**). La estación polínica de Cupressaceae fue en invierno, aunque quedó dividida en la gráfica en dos estaciones, el final y principio de los dos inviernos consecutivos, debido a que solo fue un año de análisis.



**Figura 18.** Dinámica anual de la concentración diaria de granos de polen de la familia Cupressaceae en la atmósfera de Hermosillo, Sonora, en el año 2018

Otros taxa importantes como *Bucida buceras*, *Parkinsonia*, *Phoenix roebelenii* y *Prosopis* registraron concentraciones polínicas menos elevadas, pero estaciones polínicas bien definidas (**Figura 19, Tabla 6**).



**Figura 19.** Dinámica de la concentración diaria de *Bucida buceras*, *Parkinsonia*, *Phoenix roebelenii* y *Prosopis* a lo largo del 2018.

**Tabla 6.** Características de la estación polínica de los taxa más abundantes, incluyendo el inicio, final y duración de la estación, así como la concentración máxima diaria.

Tipo polínico	Inicio de la estación	Fin de la estación	Duración de la estación (días)	Concentración máxima (granos de polen/m <sup>3</sup> )
Poaceae	19/08/2018	28/11/2018	101	359
Amaranthaceae	19/08/2018	03/12/2018	106	261
<i>Ambrosia</i>	26/03/2018	28/04/2018	33	46
	09/09/2018	29/12/2018	111	
Cupressaceae	03/01/2018	10/02/2018	38	78
	09/12/2018	22/12/2018	13	
<i>Prosopis</i>	23/03/2018	19/05/2018	57	27
<i>Phoenix roebelenii</i>	03/03/2018	01/05/2018	59	18
<i>Bucida buceras</i>	02/04/2018	09/06/2018	68	17
<i>Parkinsonia</i>	08/03/2018	07/05/2018	60	16

### V.3.2. Polen atmosférico diario y meteorología

Se determinó el nivel de correlación de las concentraciones polínicas diarias y las variables meteorológicas mediante la correlación de Spearman, así como también la correlación de las concentraciones de los cuatro tipos polínicos principales con las variables meteorológicas. Para establecer la correlación de las concentraciones diarias y la meteorología se sumaron las concentraciones de todos los tipos polínicos presentes diariamente. La **Tabla 7** muestra una baja correlación positiva de la temperatura (promedio, máxima y mínima) y la humedad relativa con las concentraciones diarias del 2018, mientras que la dirección del viento presentó una correlación negativa muy baja.

En cuanto a los tipos polínicos más abundantes, Amaranthaceae presentó correlación positiva con la temperatura, radiación solar, velocidad del viento y dirección del viento. Poaceae mostró una correlación negativa con la humedad relativa, mientras que *Ambrosia*

presentó una correlación negativa baja con la velocidad del viento y una correlación positiva con la dirección del viento. Por su parte, Cupressaceae no presentó correlación con ninguno de los parámetros meteorológicos analizados.

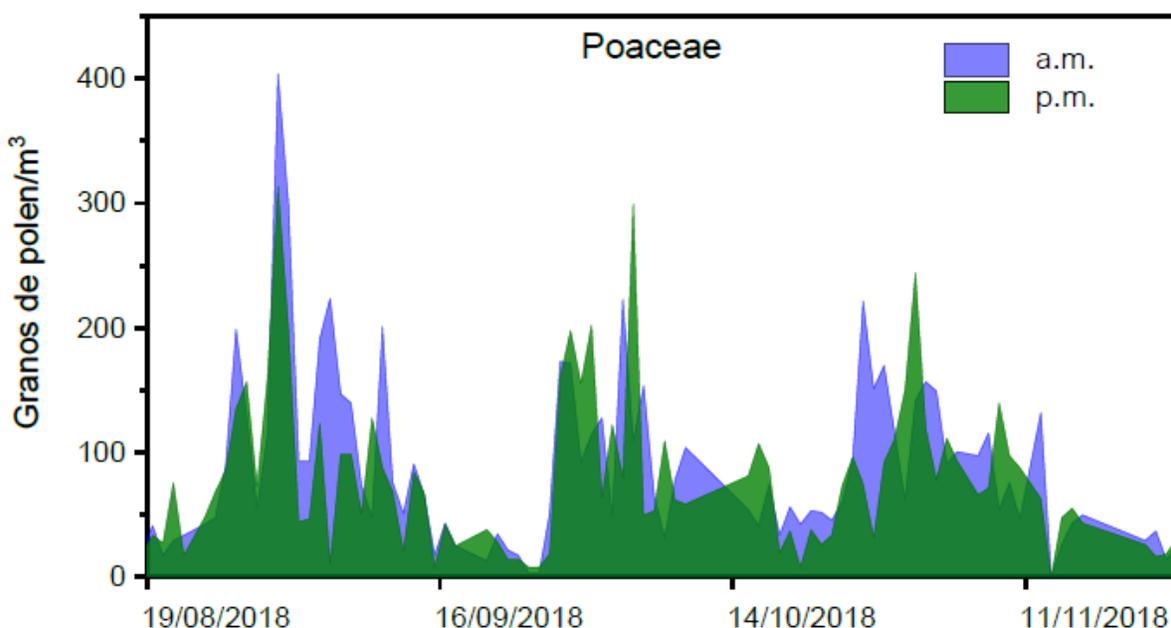
**Tabla 7.** Correlación de Spearman (\*  $p < 0.05$ ) de las concentraciones polínicas diarias de Hermosillo en 2018, los principales tipos polínicos dentro de su estación polínica y los parámetros meteorológicos.

Parámetro meteorológico	Polen diario	Amaranthaceae	Poaceae	<i>Ambrosia</i>	Cupressaceae
Temperatura prom.	<b>0.26*</b>	<b>0.57*</b>	0.16	-0.05	0.02
Temperatura máx.	<b>0.25*</b>	<b>0.57*</b>	0.16	-0.06	0.03
Temperatura mín.	<b>0.26*</b>	<b>0.56*</b>	0.15	-0.03	-0.01
Humedad relativa	<b>0.27*</b>	-0.12	<b>-0.27*</b>	0.14	-0.18
Precipitación	0.00	-0.02	-0.01	-0.06	0.00
Radiación solar	0.01	<b>0.43*</b>	0.11	-0.13	-0.01
Velocidad del viento	-0.00	<b>0.16*</b>	0.12	<b>-0.29*</b>	-0.03
Dirección del viento	<b>-0.13*</b>	<b>0.44*</b>	0.12	<b>0.24*</b>	-0.08

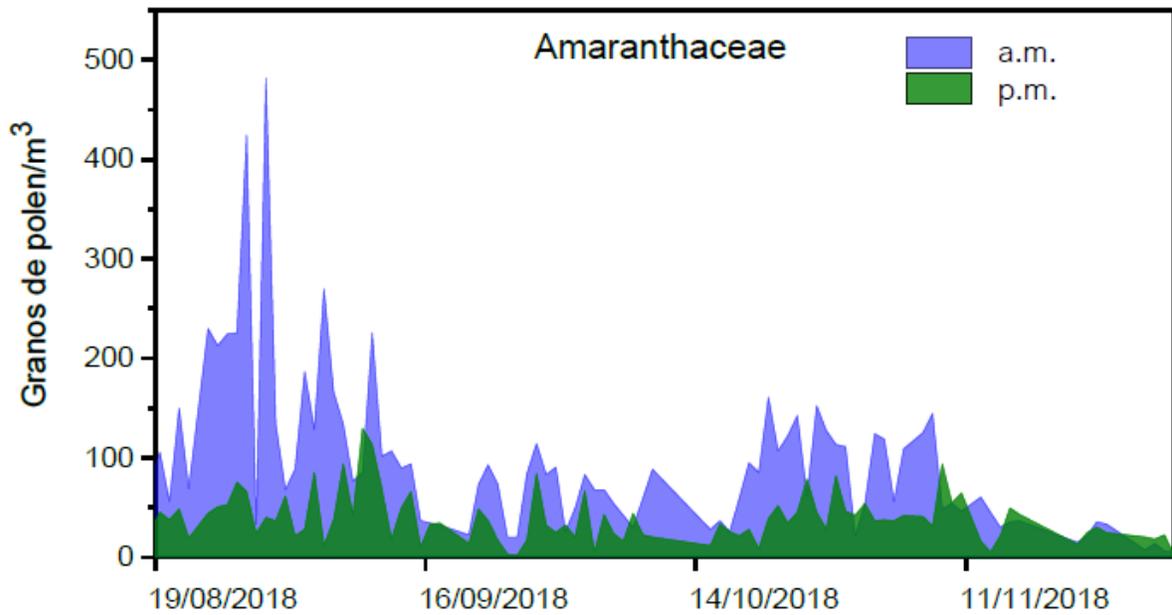
### V.3.3. Dinámica semidiurna de los principales tipos polínicos

Se determinó la dinámica semidiurna de las concentraciones polínicas de Poaceae, Amaranthaceae, *Ambrosia* y Cupressaceae en la estación polínica de cada uno de ellos. Se obtuvieron las concentraciones de polen de la mañana y tarde. A lo largo de la estación polínica correspondiente, Poaceae, Cupressaceae y *Ambrosia* no presentaron un patrón definido sobre su aporte de granos a la atmósfera por la mañana y por la tarde, es decir, algunos días el mayor aporte se daba por la mañana y otros días por la tarde. Por otro lado, Amaranthaceae sí mostró una clara tendencia a tener un mayor aporte polínico por la mañana (**Figura 20; 21; 22; 23**). En los cuatro tipos polínicos, la concentración máxima alcanzada durante su estación polínica se presentó por la mañana.

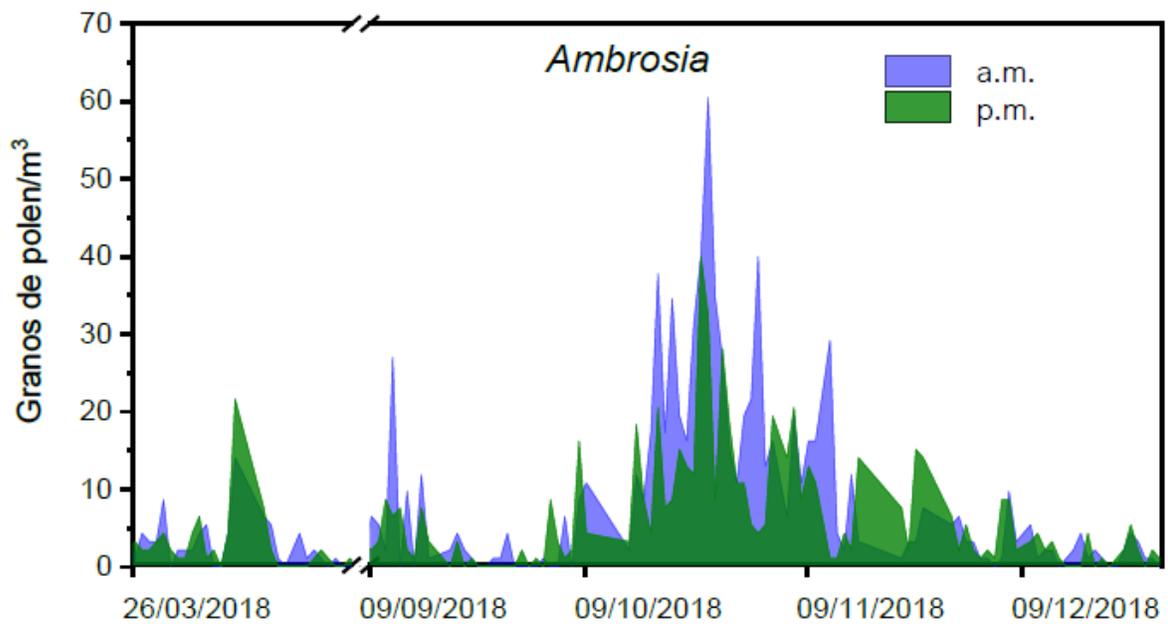
Para entender qué factores determinaron el comportamiento de las concentraciones de los cuatrotaxones, se realizaron correlaciones de Spearman con las concentraciones de la mañana y la tarde y los parámetros meteorológicos. La **Tabla 8** muestra que las concentraciones matutinas de *Amaranthaceae* se vieron favorecidas por la temperatura y la radiación solar, mientras que las concentraciones de la tarde se vieron favorecidas solo por la temperatura, con un valor de correlación menor. Las concentraciones de *Ambrosia* por la mañana fueron afectadas por la dirección del viento, y las concentraciones de la tarde resultaron beneficiadas por la humedad relativa, pero afectadas por la velocidad del viento. *Poaceae* presentó una correlación negativa con la humedad relativa y una correlación positiva con la velocidad del viento en sus concentraciones matutinas, mientras que en las concentraciones de la tarde no se presentó correlación con ningún parámetro meteorológico. Finalmente, *Cupressaceae* no tuvo correlación en sus concentraciones de la mañana y la tarde con ninguna variable meteorológica.



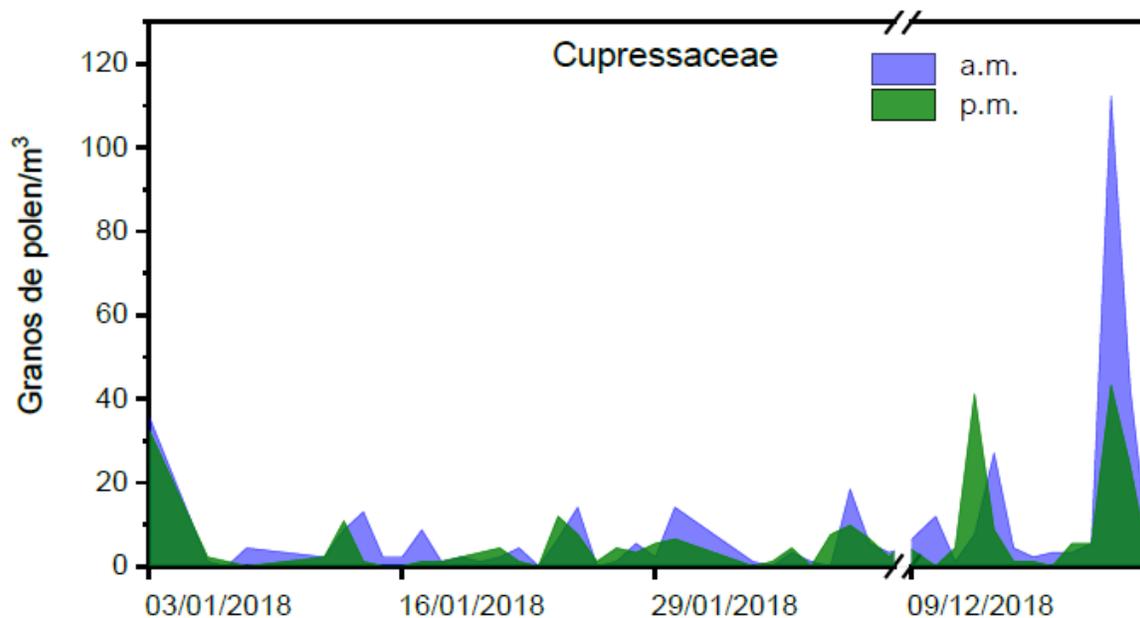
**Figura 20.** Dinámica semidiurna de *Poaceae* durante la estación polínica.



**Figura 21.** Dinámica semidiurna de Amaranthaceae durante la estación polínica.



**Figura 22.** Dinámica semidiurna de Ambrosia durante las estaciones polínicas.



**Figura 23.** Dinámica semidiurna de Cupressaceae durante las estaciones polínicas.

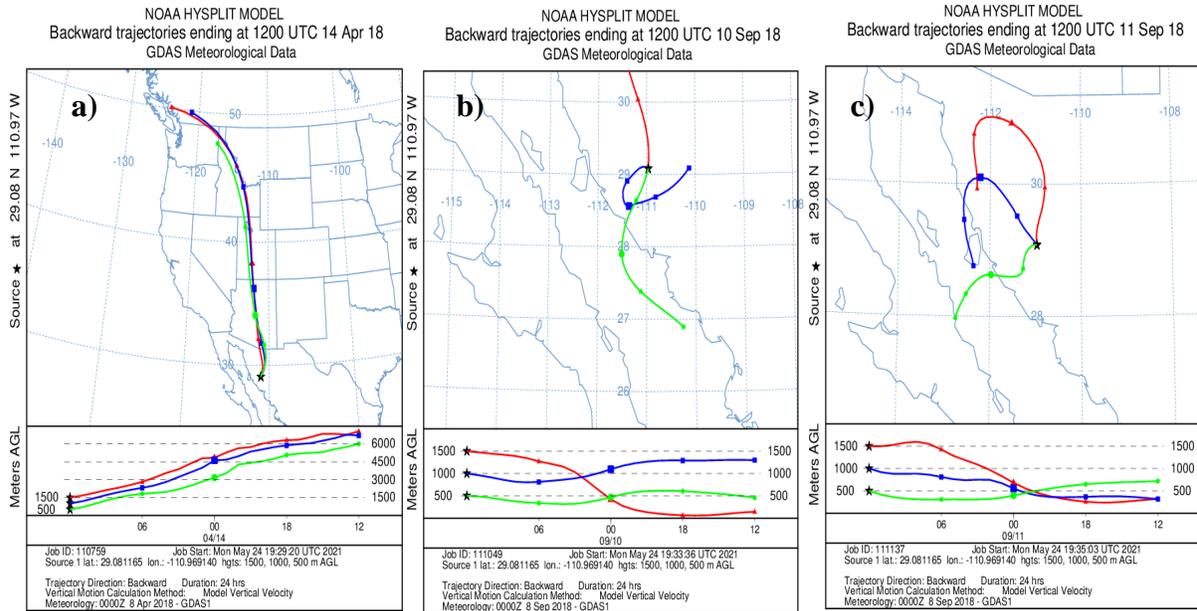
**Tabla 8.** Correlación de Spearman (\*  $p < 0.05$ ) de las concentraciones de los tipos polínicos más abundantes, divididas en mañana y tarde y los parámetros meteorológicos.

	<i>Amaranthaceae</i>		<i>Ambrosia</i>		<i>Cupressaceae</i>		<i>Poaceae</i>	
	Mañana	Tarde	Mañana	Tarde	Mañana	Tarde	Mañana	Tarde
Temperatura promedio	<b>0.54*</b>	<b>0.23*</b>	-0.02	0.02	-0.14	0.06	0.16	0.07
Temperatura máxima	<b>0.55*</b>	<b>0.25*</b>	-0.03	0.01	-0.12	0.04	0.17	0.09
Temperatura mínima	<b>0.54*</b>	<b>0.23*</b>	0.00	0.02	-0.14	0.05	0.15	0.07
Humedad relativa	-0.16	-0.03	0.14	<b>0.21*</b>	-0.13	-0.17	<b>-0.36*</b>	-0.03
Precipitación	-0.13	0.15	-0.13	0.03	0.00	0.00	-0.05	0.03
Radiación solar	<b>0.42*</b>	0.08	-0.05	-0.08	0.21	0.00	0.15	0.16
Velocidad del viento	0.16	0.03	-0.05	<b>-0.28*</b>	0.05	-0.20	<b>0.24*</b>	0.14
Dirección del viento	0.01	-0.19	<b>-0.24*</b>	-0.08	-0.01	0.09	0.08	-0.01

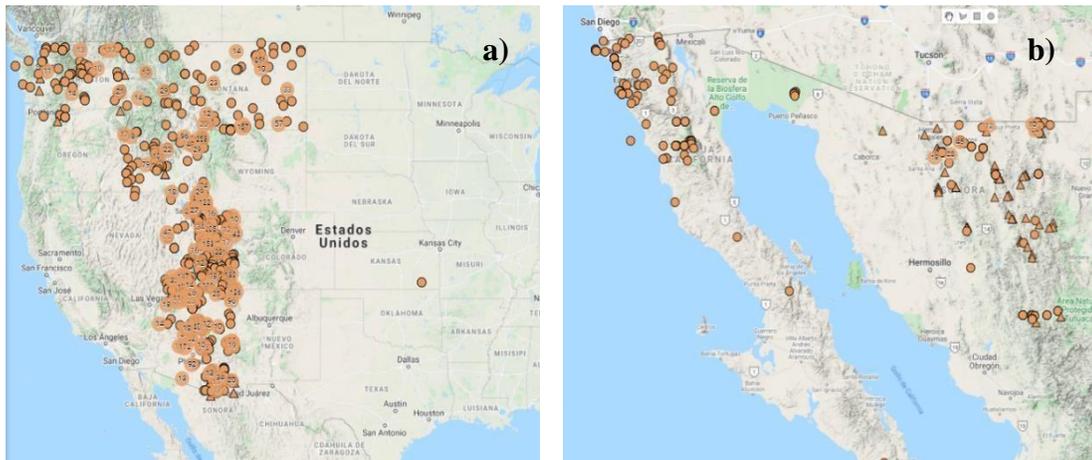
#### V.3.4. Retro-trayectorias de polen extra-local

A lo largo del año de muestreo hubo aparición puntual de granos de polen de taxa que no se distribuyen nativamente o no florecen en Hermosillo como: *Artemisia*, *Carya illinoensis*, Cupressaceae, *Pinus*, *Platanus* y *Quercus*, de los que, por su importancia como posible fuente de alérgenos, se determinó la procedencia mediante el programa HYSPLIT, considerándose tres altitudes: de 1500, 1000 y 500 m. Con la ayuda de la herramienta Map Interface de la Red de Herbarios del Noroeste de México (2020) se buscó la posible fuente de los granos de polen extralocales.

*Artemisia* se registró dentro del espectro polínico en varias ocasiones, aunque en bajas cantidades: de 1 a 9 granos de polen. El 14/04/2018, se contabilizaron 3 granos de *Artemisia*. El programa HYSPLIT mostró que los vientos de esa fecha provenían del N (**Figura 24**), mientras que la herramienta Map Interface mostró que *Artemisia* se distribuye ampliamente a lo largo y alrededor de la franja de procedencia del viento (**Figura 25**). Los días 10/09/2018 y 11/09/2018 se registraron 6 y 4 granos de polen, respectivamente. Los vientos del 10/09/2018 provenían del N, E y S, y los del día 11/09/2018 provenían del NO y O.

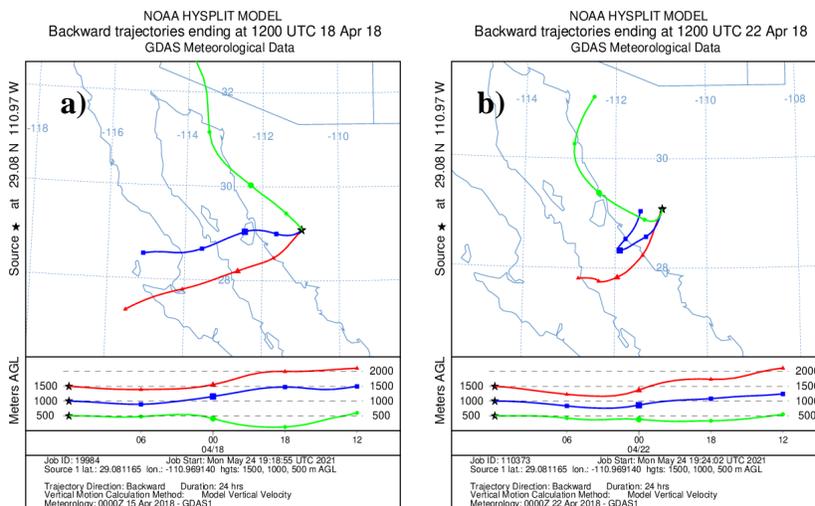


**Figura 24.** Retro-trayectorias de vientos en los días a) 14/04/2018, b) 10/09/2018 y c) 11/09/2018, en Hermsillo, Sonora.

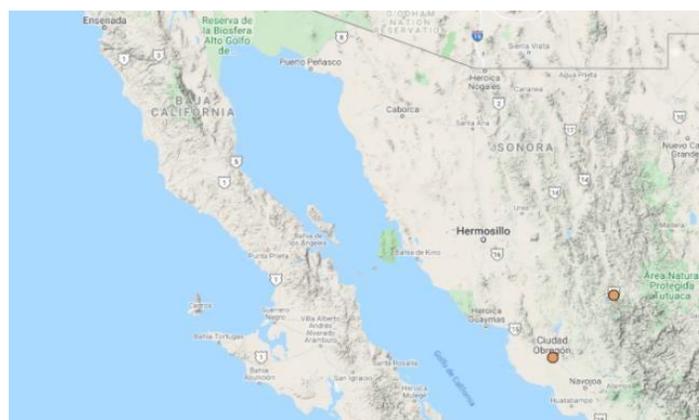


**Figura 25.** Registros de Artemisia en EE. UU (a) y noroeste de México (b), de la Red de Herbarios del Noroeste de México.

*Carya illinoensis* registró dos fechas con la aparición de 7 granos de polen el 18/04/2018 y 22/04/2018. En esos días la procedencia del viento fue de diferentes direcciones N, O y SO (**Figura 26**). Map Interface no muestra muchos registros de *Carya* que sugieran la fuente posible de los granos (**Figura 27**). Sin embargo, se sabe que existen cultivos de *Carya illinoensis* hacia el oeste de la ciudad de Hermosillo.

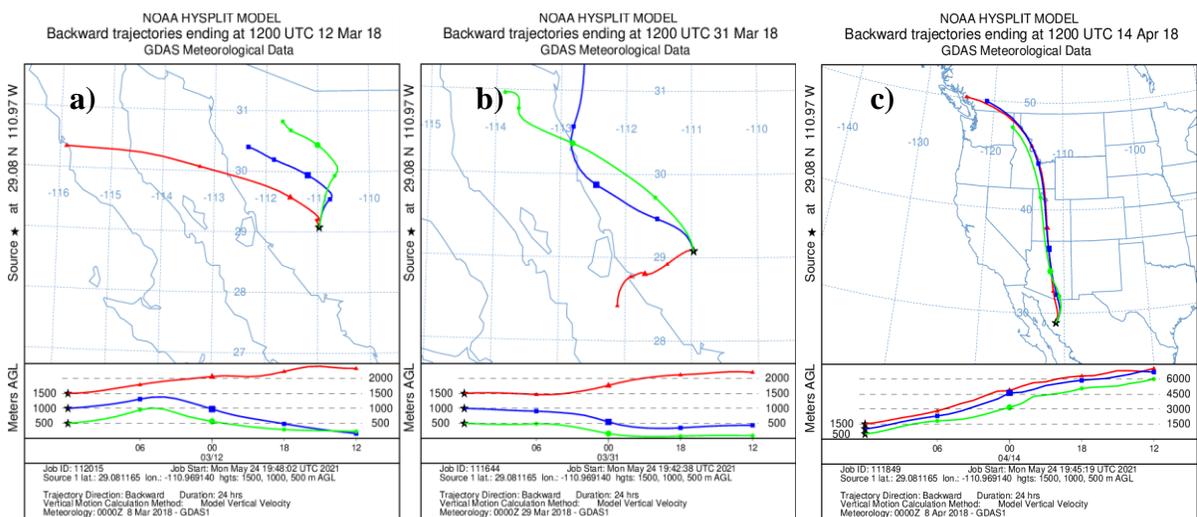


**Figura 26.** Retro-trayectorias de vientos en los días a) 18/04/2018 y b) 22/04/2018, en Hermosillo, Sonora.

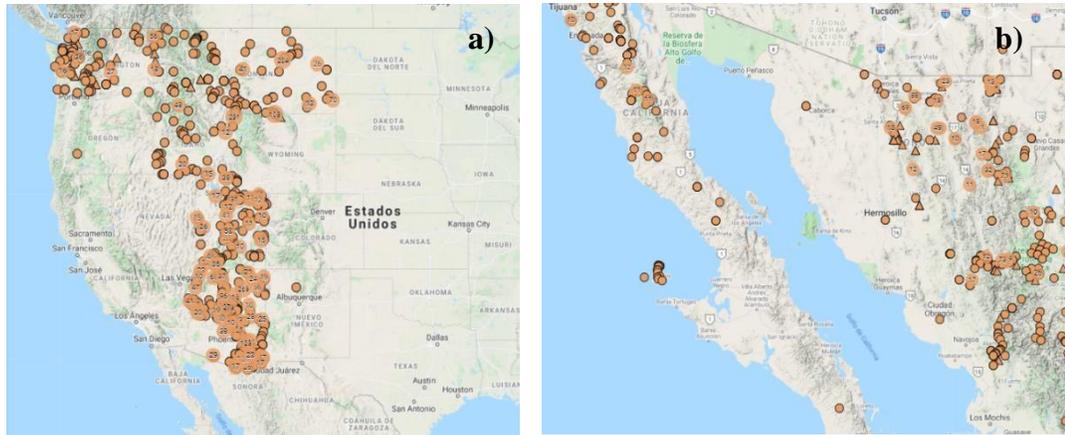


**Figura 27.** Registros de *Carya illinoensis* en el noroeste de México, obtenidos de la Red de Herbarios del Noroeste de México.

Cupressaceae se registró en muchas ocasiones a lo largo del año debido a que también se encuentra como planta de ornato dentro de la ciudad de Hermosillo. Se tomaron en cuenta fechas en las que se presentaron picos de Cupressaceae sin que hubiera apariciones posteriores de este tipo polínico. Los días 12/03/2018, 31/03/2018 y 14/04/2018 se contabilizaron 14, 18 y 21 granos de polen. El 12/03/2018 la procedencia del viento fue N, NO y O, el día 31/03/2018 el viento provenía del NO y SO, mientras que 14/04/2018 la dirección del viento fue únicamente N (Figura 28).

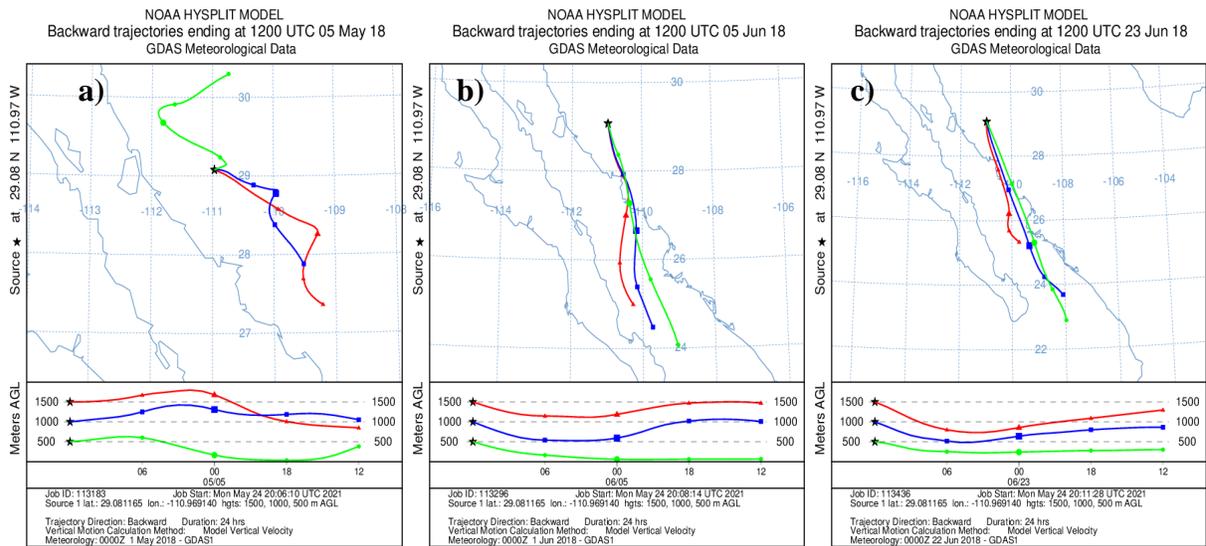


**Figura 28.** Retro-trayectorias de vientos en los días a) 13/03/2018, b) 31/03/2018 y c) 14/04/2018, en Hermosillo, Sonora.



**Figura 29.** Registros de Cupressaceae en EE. UU (a) y noroeste de México (b), de la Red de Herbarios del Noroeste de México.

*Pinus* tuvo tres días en los que se registraron los máximos valores para este taxón. El día 05/05/2018 se contabilizaron 9 granos de polen, el día 05/06/2018 aparecieron 10 granos y el 23/06/2018 12 granos. La dirección del viento el día 05/05/2018 fue N y SE. La dirección de procedencia del viento en los días 05/06/2018 y 23/06/2018 fue S (**Figura 30**). La herramienta Map Interface mostró registros de *Pinus* en municipios circundantes a Hermosillo que podrían ser las fuentes emisoras de granos de este taxón (**Figura 31**).

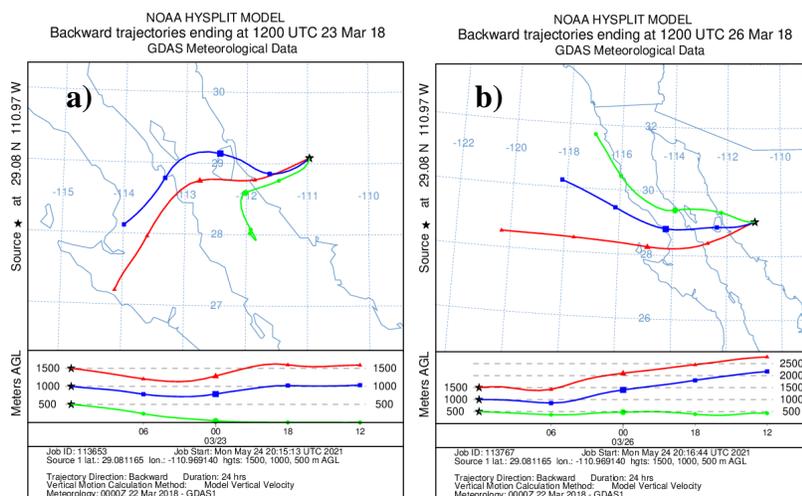


**Figura 30.** Retro-trayectorias de vientos en los días a) 05/05/2018, b) 05/06/2018 y c) 23/06/2018, en Hermosillo, Sonora.

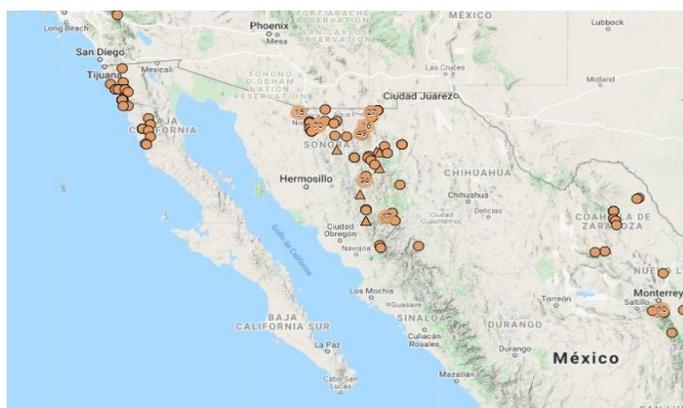


**Figura 31.** Registros de Pinus en el norte de México, obtenidos de la Red de Herbarios del Noroeste de México.

*Platanus* tuvo muy pocas apariciones en el año de muestreo. Los días 23/03/2018 y 26/03/2018 hubo registro del taxón con 3 granos de polen contabilizados. La dirección del viento en la primera fecha fue SO-O y para la segunda fecha O-NO (Figura 32). El mapa de registros de *Platanus* muestra distribución del género al NO, mientras que para la región SO-O no se tienen registros del género (Figura 33).

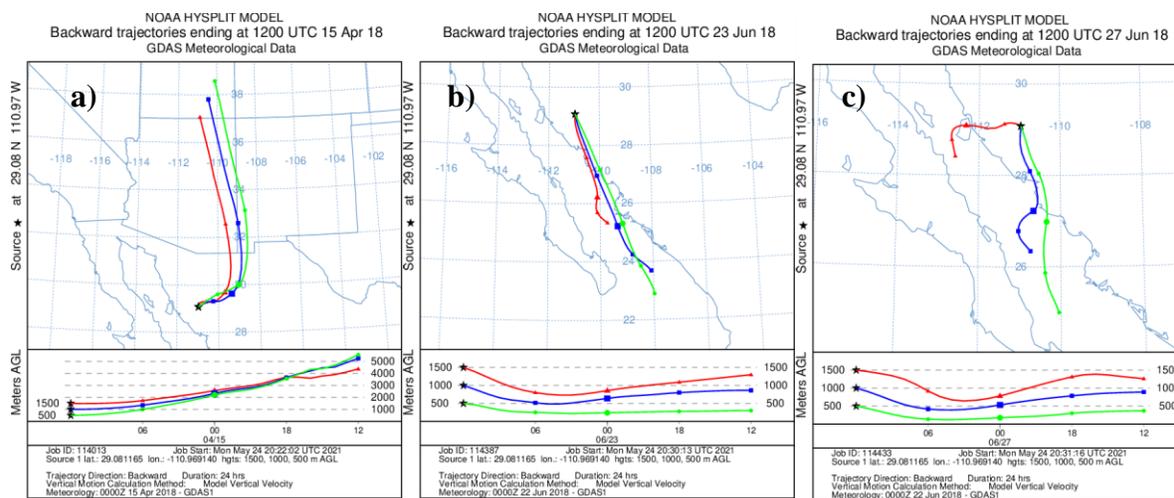


**Figura 32.** Retro-traectorias de vientos en los días a) 23/03/2018 y b) 26/03/2018, en Hermosillo, Sonora.

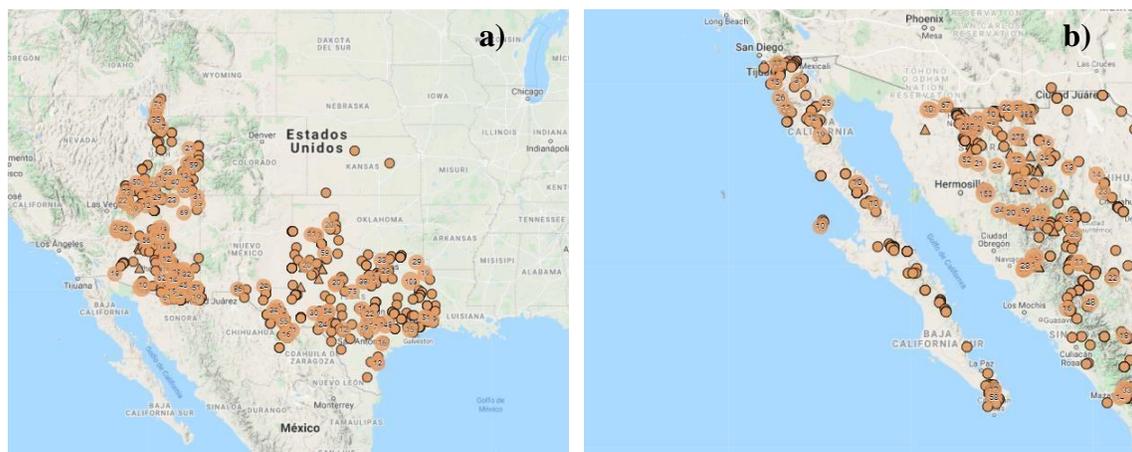


**Figura 33.** Registros de *Platanus* en el norte de México, obtenidos de la Red de Herbarios del Noroeste de México.

*Quercus* presentó tres picos de 13, 17 y 15 granos de polen en las fechas 15/04/2018, 23/06/2018 y 27/06/2018. En el día 15/04/2018 el viento provenía del N, el viento del 23/06/2018 fue procedente del S y la dirección del viento del día 27/06/2018 fue O y S (**Figura 34**). *Quercus* se distribuye hacia el N, S, E y O de Sonora (**Figura 35**).



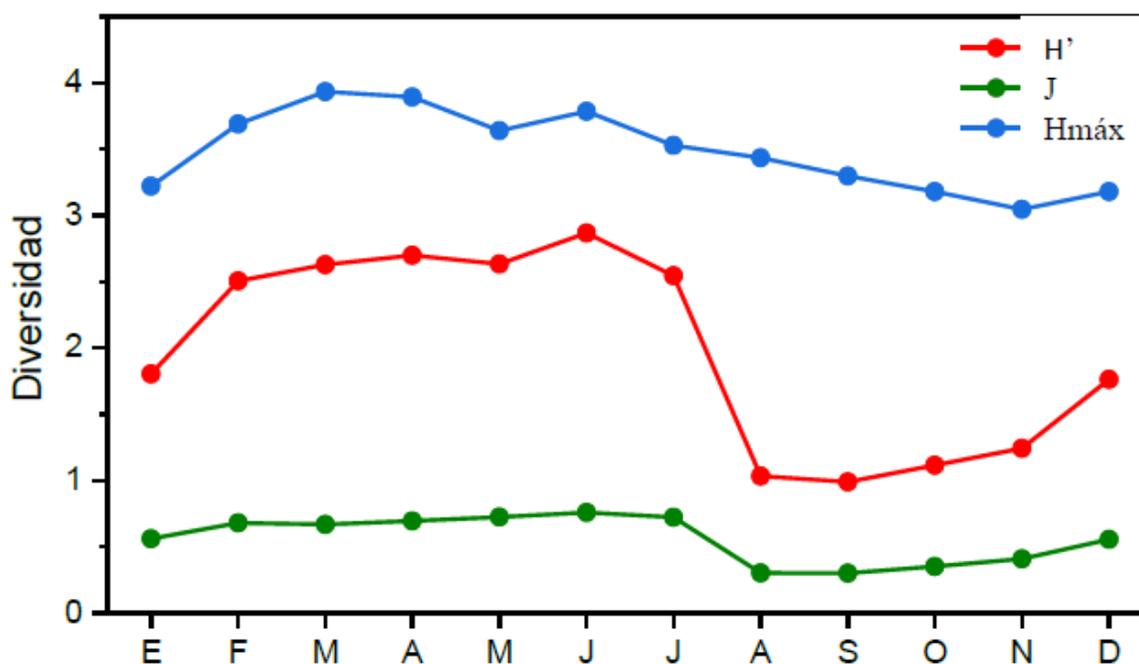
**Figura 34.** Retro-trayectorias de vientos en los días a) 15/04/2018, b) 23/06/2018 y c) 27/06/2018, en Hermosillo, Sonora.



**Figura 35.** Registros de *Quercus* en EE. UU (a) y noroeste de México (b), de la Red de Herbarios del Noroeste de México.

#### V.4. Diversidad polínica

Se obtuvo una riqueza de 88 tipos polínicos. De febrero a julio se presentaron los valores más altos de diversidad, siendo el mes de junio el más diverso, con una  $H'$  de 2.75. De enero a diciembre la  $H_{\text{máx}}$  presentó valores arriba de 3, pero en el mes de marzo se obtuvo el valor más alto de  $H_{\text{máx}}$  (3.93). Los meses de enero y agosto a diciembre fueron los menos diversos del año. El mes de septiembre obtuvo la  $H'$  más baja, con un valor de 0.99 (**Figura 36**).

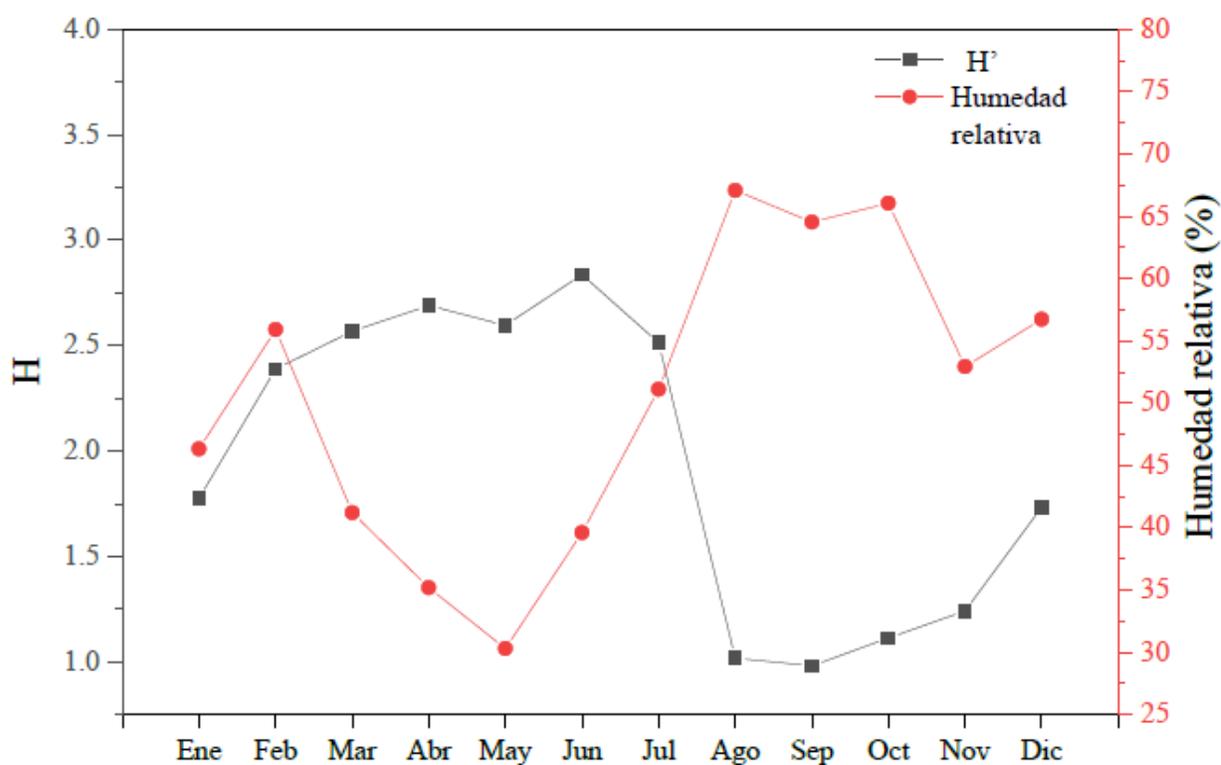


**Figura 36.** Diversidad mensual de tipos polínicos, incluyendo el Índice de Shannon ( $H'$ ), la Equitatividad ( $J$ ) y la diversidad máxima ( $H_{\text{máx}}$ ).

La correlación de Spearman (**Tabla 9**) mostró que  $H'$  se ve influenciada por la humedad relativa, con un valor de correlación de  $-0.90$  ( $p < 0.05$ ), es decir, la diversidad polínica tendió a disminuir en los meses de mayor humedad relativa y a aumentar en los meses más secos. La **Figura 37** muestra el comportamiento  $H'$  con respecto a la humedad relativa.

**Tabla 9.** Correlación de Spearman (\*  $p < 0.05$ ) del valor mensual del Índice de Shannon ( $H'$ ) y las variables meteorológicas.

Parámetro meteorológico	$H'$
Temperatura promedio	-0.03
Temperatura máxima	0.03
Temperatura mínima	-0.03
Humedad relativa	<b>-0.90*</b>
Precipitación	-0.50
Radiación solar	0.53



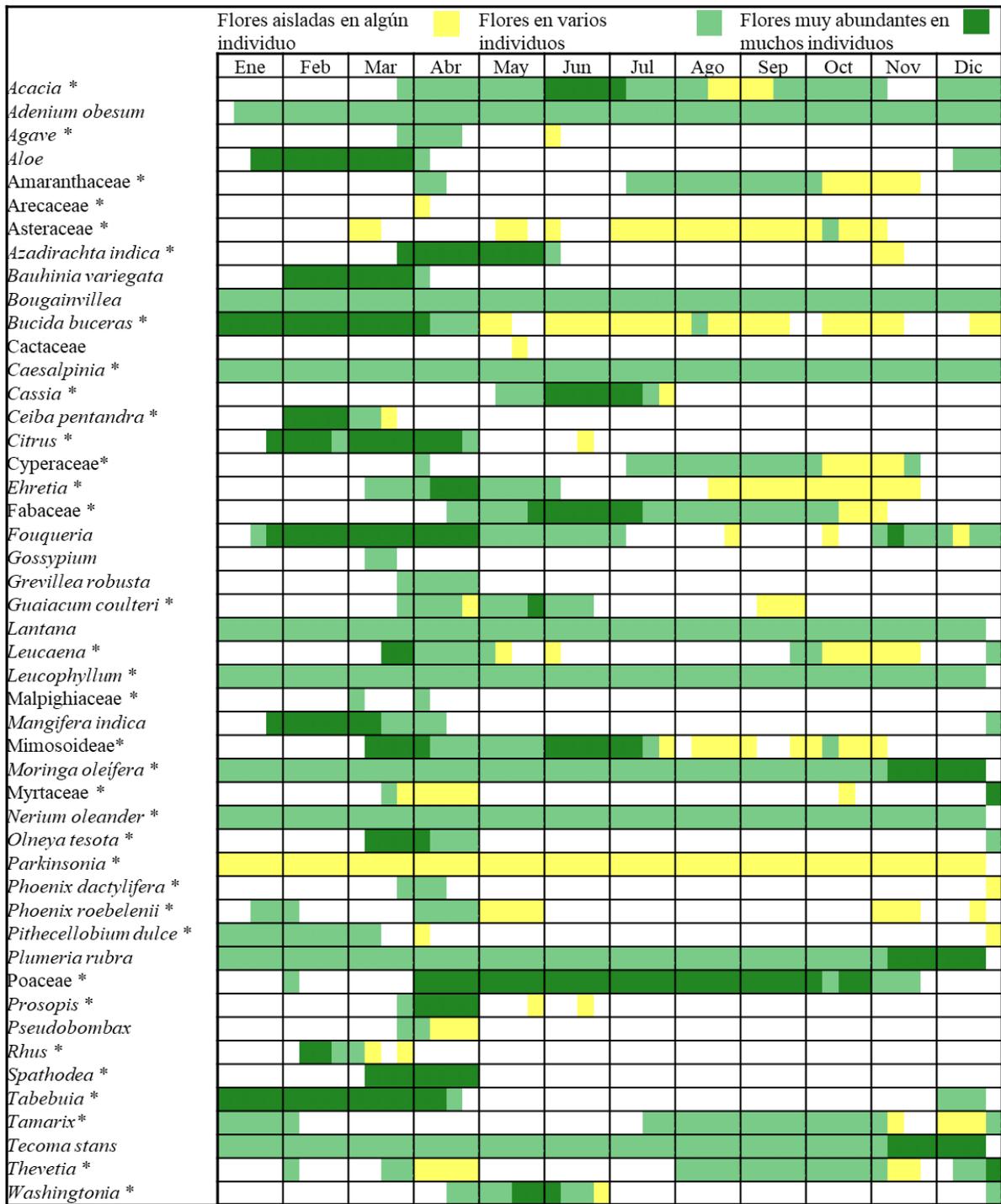
**Figura 37.** Diversidad polínica mensual ( $H'$ ) y la humedad relativa.

## V.5. Floración

Se dio seguimiento de la floración de 65 especies de plantas que se encontraron cerca del captador de partículas. Con los datos obtenidos durante ese año se elaboró un calendario de floración. Se optó por agrupar las especies por tipos polínicos para reducir el tamaño del calendario y facilitar su correlación con los datos polínicos recabados, con lo cual se obtuvo un calendario compuesto por 48 taxa (**Figura 38**). La mayoría de las plantas a las que se les dio seguimiento florecieron en primavera, especialmente en marzo y abril, de igual manera las floraciones más intensas se dieron principalmente en marzo. Algunos taxa como *Adenium obesum*, *Bougainvillea*, *Caesalpinia*, *Bucida buceras*, *Lantana*, *Leucophyllum frutescens*, *Moringa oleifera*, *Nerium oleander*, *Parkinsonia*, *Plumeria rubra* y *Tecoma stans* se encontraron en flor todo el año o gran parte de este, mientras que taxa como *Arecaceae*, *Cactaceae*, *Gossypium*, *Malpighiaceae*, *Mimosoideae* y *Phoenix dactylifera*, se vieron muy poco en flor.

En el espectro polínico se registraron 35 de los 48 taxa del calendario de floración (marcadas con \* en el calendario). Se realizaron correlaciones de Spearman con los datos de floración y los datos polínicos de los 35 taxa. A los datos del calendario se les asignaron valores de 0-3, de acuerdo con el estado de la floración; donde: plantas sin flores = 0, flores aisladas en algún individuo = 1, flores en varios individuos = 2 y flores muy abundantes en muchos individuos = 3. Para hacer equivalentes los datos polínicos con los de floración se asignaron también valores de 0-3 a las concentraciones tomando en cuenta las siguientes condiciones: concentraciones de 0 granos de polen /m<sup>3</sup> = 0, concentraciones de 1-10 granos de polen /m<sup>3</sup> = 1, concentraciones de 11-50 granos de polen /m<sup>3</sup> = 2 y concentraciones >50 granos de polen /m<sup>3</sup> = 3.

Se encontró que 12 tipos polínicos presentaron correlación ( $p < 0.05$ ) con la floración del mismo taxón, de entre ellos *Guaiacum coulteri* y *Washingtonia* fueron los que mejor vieron representada su floración en el espectro polínico, con valores de correlación significativamente altos. *Phoenix dactylifera* y *Azadirachta indica* fueron los que presentaron menor grado de correlación. En la **Tabla 10** se muestran los tipos polínicos que se sometieron a la correlación de Spearman con los datos de floración.



\* Tipos polínicos registrados dentro del espectro polínico

**Figura 38.** Calendario anual de floración de plantas cercanas al captador de partículas.

**Tabla 10.** Correlación de Spearman (\*  $p < 0.05$ ) de los datos de floración con los datos polínicos.

<b>Taxón</b>	<b>Correlación</b>
<i>Acacia</i>	0.14
<i>Agave</i>	-0.05
Amaranthaceae	<b>0.50*</b>
Arecaceae	-0.04
Asteraceae	0.13
<i>Azadirachta indica</i>	<b>0.30*</b>
<i>Bucida buceras</i>	0.07
<i>Caesalpinia</i>	0.00
<i>Cassia fistula</i>	-0.12
<i>Ceiba pentandra</i>	<b>0.38*</b>
<i>Citrus</i>	<b>0.62*</b>
Cyperaceae	0.03
<i>Ehretia tinifolia</i>	0.17
Fabaceae	0.16
<i>Guaiacum coulteri</i>	<b>0.70*</b>
<i>Leucaena leucocephala</i>	0.13
<i>Leucophyllum frutescens</i>	0.00
Malpighiaceae	-0.09
Mimosoideae	-0.07
<i>Moringa oleifera</i>	-0.14
Myrtaceae	0.13
<i>Nerium oleander</i>	0.00
<i>Olneya tesota</i>	<b>0.58*</b>
<i>Parkinsonia</i>	0.00
<i>Phoenix dactylifera</i>	<b>0.29*</b>
<i>Phoenix roebelenii</i>	<b>0.38*</b>
<i>Pithecellobium dulce</i>	0.27
Poaceae	-0.02
<i>Prosopis</i>	<b>0.50*</b>
<i>Rhus</i>	<b>0.42*</b>
<i>Spathodea</i>	-0.06
<i>Tabebuia</i>	<b>0.36*</b>
<i>Tamarix</i>	0.23
<i>Thevetia</i>	0.17
<i>Washingtonia</i>	<b>0.83*</b>

## VI. DISCUSIÓN

### VI.1. Polen atmosférico de Hermosillo

La Integral Polínica Anual alcanzada en la ciudad de Hermosillo, en 2018 fue de 19,841 polen\*día/m<sup>3</sup>. Esta cifra fue similar a la obtenida en 2013-2014 por Moreno-Sarmiento (2016) y en 2016 por Ortega-Rosas *et al.* (2019) para la ciudad. En otras ciudades con condiciones climáticas similares a las de Hermosillo, la InPA también ha mostrado ser menor a 20,000 polen\*día/m<sup>3</sup> (Ahumada-Valdez *et al.*, 2009; Perveen *et al.*, 2012, 2014; Al-Nesf *et al.*, 2020). Otra característica que también se ha observado en estudios llevados a cabo en zonas áridas es la dominancia de tipos polínicos particulares como Poaceae, Amaranthaceae y Asteraceae, particularmente *Ambrosia* (O' Rourke, 1986). En el caso de Hermosillo, el espectro polínico estuvo dominado por Poaceae, Amaranthaceae, *Ambrosia* y Cupressaceae. En conjunto, estos taxa aportaron 80.5 % de los granos de polen a la InPA. Lo anterior contrasta con regiones templadas, donde se ha reportado la dominancia de tipos polínicos como Cupressaceae, *Quercus*, *Pinus*, *Urticaceae*, *Olea*, *Populus*, *Fraxinus*, *Plantago* y Poaceae, que reflejan la vegetación de climas templados (Belmonte *et al.*, 1998; García-Mozo *et al.*, 2006; Pérez-Badia *et al.*, 2011; Calderón-Ezquerro *et al.*, 2016; Rojo *et al.*, 2016; Uguz *et al.*, 2017).

En este estudio (2018) se encontraron ligeras diferencias respecto a los tipos polínicos más abundantes de la atmósfera de Hermosillo y los reportados para el año 2016 y 2018 (estación norte) por Ortega-Rosas *et al.* (2019, 2020a). En estos dos últimos trabajos, los taxa dominantes fueron Poaceae y Nyctaginaceae, seguidos de Amaranthaceae y *Ambrosia*. Además, la InPA para el año 2018 fue de 7,899 polen \* día/m<sup>3</sup> (Ortega-Rosas *et al.*, 2020a), menor que la InPA obtenida en el presente trabajo. Estas diferencias se atribuyen a la localización de los equipos de muestreo. El captador utilizado para la realización del presente trabajo y el de los trabajos de Ortega-Rosas *et al.* se encontraban situados en distintos puntos de la ciudad, uno en el centro y otro al norte, con una separación de alrededor de 4.5 km.

Se ha reportado que existen diferencias entre distintos sitios de muestreo en una misma ciudad (Arobba *et al.*, 2000; Katelaris *et al.*, 2004; Velasco-Jiménez *et al.*, 2012; Rocha-Estrada *et al.*, 2013), asimismo, que la distribución heterogénea de la flora en diferentes áreas de la ciudad puede dar lugar a diferencias en el espectro polínico (Fernández-Rodríguez

*et al.*, 2014). La desemejanza entre el contenido polínico de la zona centro y norte de Hermosillo podría deberse, precisamente, a diferencias en la distribución de la vegetación y a la orografía. De norte a este de la ciudad se localiza el cerro El Bachoco junto a otras elevaciones, que podrían actuar como barrera para los vientos de niveles bajos que provienen de esas direcciones, afectando la dispersión de polen cercana al captador del área norte, mientras que el captador de la zona centro está en un área más abierta y alejado de elementos fisiográficos que pudieran obstaculizar el viento. Por otra parte, en el centro y sur de la ciudad hay mayor cobertura vegetal que en el norte (Ortega-Rosas *et al.*, 2020b).

## **VI.2. Dinámica del polen atmosférico a lo largo del año**

En el 2018 se presentaron dos periodos donde se registraron altas concentraciones polínicas. El primer periodo sucedió en primavera, centrado en abril y el segundo abarcó desde mediados de agosto hasta poco más de la mitad de noviembre. Un patrón bimodal similar se reportó para años anteriores en la ciudad de Hermosillo (Moreno-Sarmiento, 2016; Ortega-Rosas *et al.*, 2019), aunque con diferencias en la extensión de los periodos, y para Ciudad Obregón (Moreno-Sarmiento *et al.*, 2016a). En otras ciudades desérticas también se ha reportado una dinámica (patrón bimodal) semejante a la de Hermosillo (Halwagy, 1994; Perveen *et al.*, 2012; Al-Nesf *et al.*, 2020). En contraste, ciudades con clima templado, y por añadidura, con tipos de vegetación muy diferentes al de Hermosillo, han presentado un solo periodo de concentraciones polínicas elevadas (Alba-Sánchez, 1997; García-Mozo *et al.*, 2006; Melgar *et al.*, 2012; Tosunoglu *et al.*, 2015; Calderón-Ezquerro *et al.*, 2016; Rojo *et al.*, 2016).

Las Integrales Polínicas Mensuales de Hermosillo tuvieron sus valores máximos en septiembre (4,783 polen \* día/m<sup>3</sup>) y octubre (4,417 polen \* día/m<sup>3</sup>), seguidos de agosto (2,755 polen \* día/m<sup>3</sup>) y noviembre (2,970 polen \* día/m<sup>3</sup>). De enero a julio, las InPM no rebasaron los 600 polen \* día/m<sup>3</sup>, a excepción del mes de abril, que presentó una InPM de 1,253 polen \* día/m<sup>3</sup>. Por ello, se consideró que el primer periodo de concentraciones polínicas elevadas se presentó en abril. En 2013, el mayor contenido polínico atmosférico se presentó también en septiembre (Moreno-Sarmiento, 2016), pero la InPM fue mayor que la de este año de estudio (2018). Sin embargo, en 2013, los meses de agosto, octubre y noviembre no tuvieron una

InPM tan alta como la que presentaron en el 2018, a pesar de que en agosto del 2018 se interrumpió el monitoreo polínico por dos semanas. El análisis de las condiciones meteorológicas mostró que el año 2013 presentó un periodo de lluvias de verano más corto que el del año 2018. En 2013 las lluvias comenzaron en julio y terminaron en septiembre (165.9 mm), mientras que en el 2018 las precipitaciones se presentaron desde junio hasta octubre (274.4 mm), con una mayor cantidad de lluvia acumulada. Esta disparidad en las condiciones del 2013 y 2018 pudo haber causado las diferencias en las InPM, y en general, de la dinámica anual. En regiones desérticas como Hermosillo, la precipitación estival es irregular espacial y temporalmente, tanto a escala intra- como interanual (Brito-Castillo *et al.*, 2010).

En el periodo de mayor contenido polínico hubo fechas en las que las concentraciones de polen disminuyeron drásticamente. Algunas de estas fechas coinciden con eventos de lluvias importantes en la ciudad. La lluvia puede limpiar la atmósfera de manera diferente dependiendo de la duración y extensión de esta (O'Rourke, 1986). Las lluvias ligeras y prolongadas causan un lavado de la atmósfera, mientras que las lluvias torrenciales y de corta duración no tienen tal efecto (Alba-Sánchez, 1997).

El 15/09/2018 se registró una lluvia ligera que se vio reflejada en la disminución de la concentración polínica del siguiente día, de 170 (15/09/2018) hasta 38 granos de polen/m<sup>3</sup> (16/09/2018). Del 17/09/2018 al 20/09/2018, la depresión tropical DT19E dejó un acumulado de lluvias importantes en Hermosillo, lo que causó que las concentraciones polínicas permanecieran bajas en esos días y días posteriores, y el día 19/09/2018 se presentara una concentración de 6 granos de polen/m<sup>3</sup>. El 19/09 se presentó una lluvia acumulada de 44.9 mm, que tuvo una duración de aproximadamente 5 horas, lo que podría haber causado un lavado de la atmósfera, dada la baja concentración polínica de ese día. El 11/10/2018 nuevamente se registró una disminución en la concentración de polen, posiblemente, causada por los efectos del Huracán Sergio (11/10/2018-12/10/2018). Ese día se registró una lluvia de débil a moderada que se extendió por aproximadamente 13 h y una disminución en la radiación solar recibida. Es probable que también se haya dado un lavado de la atmósfera que se pudo haber visto representado en la concentración polínica del día siguiente, sin embargo, no se tienen datos del día 12/10/2018 que permitan constatarlo.

### **VI.2.1. Polen diario y meteorología**

De acuerdo con el análisis estadístico, las concentraciones polínicas diarias de la ciudad de Hermosillo aumentaron con la temperatura y la humedad relativa y disminuyeron con la dirección del viento, aunque el coeficiente de correlación de este último fue muy bajo para considerar que tuvo un efecto importante en las concentraciones de polen. Moreno-Sarmiento (2016) mencionó que los parámetros que favorecen las concentraciones polínicas en Hermosillo son la temperatura, humedad relativa y precipitación y Ortega-Rosas *et al.* (2019) reportaron que las concentraciones de polen aumentan en función de las temperaturas elevadas y la humedad relativa. En el caso del presente trabajo (2018), el análisis estadístico no reflejó una relación respecto a las precipitaciones y el contenido polínico de la atmósfera, probablemente debido a la poca cantidad de lluvias que se presentaron (18 días con lluvia), lo que dificultó encontrar una correlación, pues en la mayor parte del año la precipitación fue 0 mm, mientras las concentraciones polínicas fluctuaron en función de diferentes factores. Estudios previos a lo largo del mundo han reportado la relación del polen con las temperaturas, la humedad relativa y la precipitación, sin embargo, la mayoría de estos lugares difieren en condiciones respecto a Hermosillo (Ribeiro *et al.*, 2003; Stennett y Beggs, 2004; García-Mozo *et al.*, 2006; Sahney y Chaurasia, 2008; Ahumada-Valdez *et al.*, 2009; Calderón-Ezquerro *et al.*, 2016).

### **VI.3. Dinámica de los principales tipos polínicos y su relación con la meteorología**

Poaceae, el tipo polínico más abundante de Hermosillo, estuvo presente a lo largo de casi todo el año en la atmósfera. Su dinámica mostró un periodo de concentraciones elevadas desde agosto hasta noviembre (19/08/2018-28/11/2018). Este patrón ya se había observado en años anteriores en la ciudad (Moreno-Sarmiento, 2016; Ortega-Rosas *et al.*, 2019), y se explica por el hecho de que en esos meses se recibe el máximo de precipitaciones en Hermosillo, lo que promueve el desarrollo y la floración de las gramíneas. En otras partes del mundo, especialmente ciudades europeas (Emberlin *et al.*, 1993; García-Mozo *et al.*, 2006; Muñoz *et al.*, 2010; Recio *et al.*, 2010), la estación de Poaceae es en primavera (Hasnain *et al.*, 2005; Aboulaich *et al.*, 2013).

Las concentraciones polínicas de Poaceae durante la estación polínica incrementaron cuando la humedad relativa disminuyó. El efecto negativo de la humedad relativa en las concentraciones polínicas de gramíneas ya se ha señalado anteriormente (Puc y Puc, 2004; Kasprzyk y Walanus, 2010; Aboulaich *et al.*, 2013; Perveen *et al.*, 2014; Moreno-Sarmiento *et al.*, 2016a). Esto puede explicarse por el hecho de que la alta humedad relativa afecta la dehiscencia de las anteras en algunas plantas, o bien, puede afectar la antesis, como sucede con el maíz (Marceau *et al.*, 2011). Amaranthaceae tuvo una única estación polínica que se presentó desde la segunda mitad de agosto hasta principios de diciembre (19/08/2018-03/12/2018). Un patrón similar se reportó para otros años en Hermosillo (Moreno-Sarmiento, 2016), Kuwait (Halwagy, 1994; Behbehani *et al.*, 2004), España (Rodríguez De La Cruz *et al.*, 2012) y Qatar (Al-Nesf *et al.*, 2020). La floración de Amaranthaceae se da principalmente en verano y otoño (Shreve y Wiggins, 1964), quedando bien representado en su estación polínica.

Las emisiones de polen de Amaranthaceae en la estación polínica variaron en función de la meteorología. La temperatura, la radiación solar, la dirección y velocidad del viento fueron los parámetros que favorecieron las concentraciones de este tipo polínico. Moreno-Sarmiento (2016) reportó que las concentraciones de Amaranthaceae incrementan con la temperatura, pero disminuyen con la velocidad del viento, y Gioulekas *et al.* (2004), que la temperatura y la velocidad del viento favorecen las concentraciones.

El polen de Amaranthaceae y Poaceae se registró en la atmósfera a lo largo de casi todo el año en concentraciones bajas (excepto en la estación polínica), lo que sugiere que pudo tratarse de granos resuspendidos. En el sur de Arizona (norte del Desierto Sonorense), el polen resuspendido constituyó más del 10% de la InPA y los principales tipos polínicos que contribuyeron a esta cifra fueron Poaceae y Amaranthaceae (O'Rourke, 1990). En Hermosillo, la baja humedad relativa facilita la resuspensión del polen, ya que las condiciones secas promueven dicho proceso (O'Rourke, 1986).

*Ambrosia* estuvo presente gran parte del año en Hermosillo, con dos estaciones polínicas: una en primavera y otra en otoño, esta última especialmente intensa en octubre y noviembre, como se reportó previamente (Ortega-Rosas *et al.*, 2019). En estos periodos las concentraciones de *Ambrosia* se correlacionaron positivamente con la dirección del viento y negativamente con la velocidad del viento. El efecto negativo de la velocidad del viento en las

concentraciones polínicas de *Ambrosia* ya ha sido notado con anterioridad en otras regiones (Ianovici *et al.*, 2013; Matyasovszky *et al.*, 2015), así como la relación con la dirección del viento (Cecchi *et al.*, 2006).

La vegetación local de la ciudad de Hermosillo está conformada por tres especies de *Ambrosia* (**Tabla 2**), cada una de ellas con diferentes periodos de floración. *Ambrosia ambrosioides* florece en primavera, de marzo a mayo; *A. confertiflora* presenta un periodo de floración muy extenso, de marzo a octubre; y, por su parte, *A. monogyra* florece de agosto a noviembre (Dimmitt, 2015b; Red de Herbarios del Noroeste de México, 2021). Los datos polínicos sugieren que la estación polínica de primavera corresponde con la floración de *A. ambrosioides* y *A. confertiflora*, mientras que, la estación polínica de otoño con la floración de las especies *A. confertiflora* y *A. monogyra*. Se ha reportado que los granos de *Ambrosia* tienen la capacidad de reincorporarse a la atmósfera por efecto de resuspensión (O'Rourke, 1990). Por lo cual, se sugiere que el polen registrado fuera de las estaciones polínicas de *Ambrosia* podría ser resuspendido.

La estación polínica de Cupressaceae se presentó en los meses de invierno, con registros a lo largo del año. En otros estudios, se ha reportado que la época de presencia de Cupressaceae es de enero a abril (Arobba *et al.*, 2000), de enero a junio (Gioulekas *et al.*, 2004) y de febrero a mayo (Ianovici *et al.*, 2013). Por su parte, Calderón-Ezquerro *et al.* (2016) mencionan que las concentraciones más altas de Cupressaceae se registran en enero. Estos resultados coinciden con el presente trabajo en que la estación polínica abarca, aunque sea en parte, la estación de invierno.

La estación polínica, y, en general, la dinámica de Cupressaceae fue muy irregular, con picos discontinuos dentro y fuera de la estación polínica, lo que hace suponer que el aporte de granos de este tipo polínico proviene no solo de fuentes locales (plantas introducidas dentro de la ciudad), sino también de fuentes extra-locales. En el caso de las plantas de ornato, por su cercanía con el captador de partículas, se consideran como la principal fuente de granos, y posiblemente, las que determinen la estación polínica de Cupressaceae. Por su parte, el aporte polínico de fuentes extra-locales determinado por eventos de transporte a larga distancia, estaría explicando algunos de los picos de concentraciones que se presentaron fuera de la estación polínica. Se ha reportado que Cupressaceae presenta un patrón multimodal de concentraciones

polínicas, probablemente debido al gran número de especies que incluye (García-Mozo *et al.*, 2006), lo que también podría justificar la dinámica del taxón en Hermosillo, ya que incluye especies introducidas a la vegetación urbana y especies nativas que se encuentran lejos de la ciudad. Las concentraciones de Cupressaceae no se correlacionaron con ningún parámetro meteorológico, seguramente por el comportamiento irregular de las mismas y que proviene de diversas fuentes. No obstante, en otros estudios en zonas templadas se ha encontrado una relación positiva de este taxón con la temperatura y la velocidad del viento (García-Mozo *et al.*, 2006; Calderón-Ezquerro *et al.*, 2016).

### **VI.3.1. Variaciones semidiurnas de los principales tipos polínicos**

Las concentraciones de Poaceae en la estación polínica reflejaron variaciones semidiurnas, presentándose las concentraciones más altas algunos días en la mañana (00:00-11:59 a.m.) y otros días en la tarde (12:00-11:59 p.m.). Ribeiro *et al.* (2008) encontraron un patrón bimodal para Poaceae, con picos en la mañana y en la tarde. Por otro lado, Aboulaich *et al.* (2013) y Uguz *et al.* (2017) reportaron que las concentraciones más altas se registraron en la tarde. En un estudio de varios años, Muñoz *et al.* (2010) determinaron que la polinización de Poaceae es mayor por la tarde. Sin embargo, los picos que se presentaron varían mensual e interanualmente. Asimismo, Muñoz *et al.* (2010) también mencionaron que las diferencias encontradas en los patrones horarios de Poaceae corresponden a los diversos ritmos de polinización entre géneros y especies que componen este taxón. Cabe resaltar que, los estudios antes mencionados, se llevaron a cabo en ciudades con condiciones climáticas, meteorológicas y botánicas muy diferentes a las de Hermosillo, por lo que no es extraño que haya discordancia con sus resultados y los del presente trabajo. De hecho, Kasprzyk *et al.* (2001) señalaron que existen diferencias en el patrón diurno de Poaceae entre sitios relativamente próximos con condiciones climáticas y geobotánicas distintas, y, además, que el patrón de este taxón es irregular, por lo que es difícil que se repita el comportamiento diario de Poaceae entre sitios. Por otro lado, tomando en consideración lo dicho por Muñoz *et al.* (2010), el polen de Poaceae que se registró en la ciudad de Hermosillo puede provenir de al menos 16 géneros y 26 especies que se encuentran cercanas

al captador de partículas (**Tabla 2**), lo que explicaría también la heterogeneidad en la dinámica semidiurna de Poaceae.

Respecto a la influencia de las variables meteorológicas en las concentraciones de la primera y segunda mitades del día de Poaceae, se encontró que la humedad relativa afecta negativamente las concentraciones de la mañana y la velocidad del viento tiene el efecto contrario. Las concentraciones de la segunda parte del día de Poaceae no presentaron correlación con ningún parámetro meteorológico. Tosunoglu y Bicakci (2015) reportaron que las concentraciones de Poaceae se correlacionaron negativamente con los dos parámetros mencionados anteriormente, habiendo disparidad en el efecto de la velocidad del viento entre ese y el presente estudio. Valencia-Barrera *et al.* (2001) explicaron que la velocidad del viento puede afectar positivamente las concentraciones polínicas al incrementar la liberación de polen de las anteras, como sucedió en la ciudad de Hermosillo, y negativamente al incrementar el volumen de aire donde el polen se dispersa.

Amaranthaceae presentó un patrón semidiurno homogéneo, donde las concentraciones fueron mayores por la mañana (salvo en muy pocas ocasiones). Las diferencias entre las concentraciones de la primera y segunda parte del día son muy claras, sobre todo en la primera parte de la estación polínica, y no tanto, a finales de esta. El estudio de polen bihorario de 20 muestras de la estación polínica de Amaranthaceae de 2018 en Hermosillo mostró que las mayores concentraciones se presentaron en la mañana, de 6:00 a las 12:00 horas (Acosta Murrieta, 2021). El patrón de Amaranthaceae en la ciudad Hermosillo fue similar al que reportaron Perveen *et al.* (2014) en Khairpur, Pakistan y difirió del que se presentó en Salamanca, España, donde las concentraciones de este taxón son superiores por la tarde (Rodríguez De La Cruz, *et al.*, 2012). En un estudio de tres años, Trigo *et al.* (1997) encontraron que Amaranthaceae tiene un patrón diurno muy estable, por lo que es muy posible que el patrón que se registró en 2018 se repitiera en otros años.

En cuanto a la relación de las concentraciones de la mañana y tarde con los parámetros meteorológicos, las concentraciones de Amaranthaceae respondieron a la temperatura y la radiación solar en la primera parte del día y a la temperatura en la segunda parte del día. Rodríguez De La Cruz *et al.* (2012) mencionaron que las concentraciones de Amaranthaceae

están asociadas positivamente con la temperatura y negativamente con la humedad relativa y la precipitación.

A lo largo de sus estaciones polínicas el aporte de *Ambrosia* fue muy variable. En la primera estación polínica la mayor concentración de polen sucedió algunos días en la mañana y otros en la tarde. En la primera mitad de la siguiente estación polínica las concentraciones fueron predominantemente mayores por la mañana, mientras que en la segunda mitad el patrón semidiurno fue más variable. Como se mencionó previamente, hay tres especies inmediatamente circundantes al captador que estarían aportando la mayor parte de los granos de *Ambrosia* registrados en la atmósfera. Cada una de estas especies presenta un periodo de floración distinto, y posiblemente, también un patrón de polinización diferente, causando esas variaciones en el patrón semidiurno a lo largo de las dos estaciones polínicas.

Kasprzyk (2006) encontró que la concentración de *Ambrosia* es mayor en la primera parte del día en la ciudad de Rzeszów, Polonia. Por su parte, Makra *et al.* (2005) mencionaron que *Ambrosia* presenta un patrón de polinización unimodal que comienza en la mañana, con máximos en la tarde, y que la disminución en la humedad relativa incrementa la polinización. No obstante, en este estudio se registró un patrón semidiurno más variable, donde las concentraciones de la mañana se correlacionaron negativamente con la dirección del viento y las de la tarde positivamente con la humedad relativa y negativamente con la velocidad del viento.

Cupressaceae presentó un patrón semidiurno muy variable, tal como su dinámica anual. Las concentraciones tanto de la mañana como de la tarde no respondieron a ningún parámetro meteorológico. El comportamiento irregular del taxón se atribuyó a que pudo haber varias especies contribuyendo al aporte polínico, y, quizás, cada una de ellas con ritmos de polinización distintos, sobre todo entre las plantas de ornato y las provenientes de otras regiones. Diversos estudios han coincidido en que las mayores concentraciones de Cupressaceae se han presentado en la primera parte del día (Ribeiro *et al.*, 2008; Tosunoglu y Bicakci, 2015; Uguz *et al.*, 2017). Por otra parte, en el trabajo de Calderón-Ezquerro *et al.* (2016), llevado a cabo en México, se encontró que las mayores concentraciones de Cupressaceae se dan en la tarde.

#### **VI.4. Otros tipos polínicos de la atmósfera de Hermosillo**

En 2018 se registraron algunos taxa que tuvieron un aporte cuantitativo importante al espectro polínico de la ciudad de Hermosillo, estos fueron: *Bucida buceras*, *Parkinsonia*, *Phoenix roebelenii* y *Prosopis*. La dinámica de los cuatro tipos polínicos fue muy similar. Todos los tipos polínicos presentaron su estación polínica en primavera (pudiendo haber iniciado a finales de invierno), con una duración que fue casi de la misma extensión, salvo la de *Phoenix roebelenii*, que se prolongó un poco más.

Las InPA de *Bucida buceras*, *Parkinsonia*, *Phoenix roebelenii* y *Prosopis* fueron de 239, 169, 275 y 364 polen\*día/m<sup>3</sup>, respectivamente. Cabe mencionar que, *Bucida buceras* no se había registrado antes en la atmósfera de Hermosillo, a pesar de que es uno de los árboles introducidos más comunes dentro de la ciudad (Navarro-Navarro y Moreno-Vázquez, 2016). Por otra parte, la InPA de *Phoenix roebelenii* en 2013-2014 fue de 82 polen\*día/m<sup>3</sup> (Moreno-Sarmiento, 2016), mientras que para este año de estudio ese valor se triplicó, lo que podría estar indicando que se han introducido más plantas de esta especie a la ciudad.

#### **VI.5. Aporte polínico extra-local por medio del transporte de larga distancia**

Otros tipos polínicos que no forman parte de la vegetación nativa de Hermosillo, pero sí de la flora de Sonora, se registraron en la atmósfera en bajas concentraciones y en la mayoría de los casos esporádicamente. Mediante las retro-trayectorias de vientos se comprobó que los granos de *Artemisia* provenían de una fuente extra-local, específicamente del norte de Sonora el día 14/04/2018 y de la Sierra Madre Occidental los días 10/09/2018 y 11/09/2018 (Red de Herbarios del Noroeste de México, 2020). Los granos de polen de *Carya illinoensis* provenían del oeste, de acuerdo con el modelo de retro-trayectorias, coincidiendo con la dirección de los cultivos de nuez de la Costa de Hermosillo, que se encuentran hacia el oeste de la ciudad. El transporte de larga distancia de Cupressaceae se comprobó con las retro-trayectorias de vientos. El día 13/03/2018 los vientos provenían del noroeste, en dirección de la Sierra de San Pedro Mártir, donde también hay registros de este taxón (Red de Herbarios del Noroeste de México, 2020). Por otra parte, se determinó que los granos de *Quercus* provenían del norte de Sonora

(15/04/2018), los de *Pinus* de la Sierra Madre Occidental (05/05/2018) y los de *Platanus* de alguna de las sierras de Baja California (26/03/2018) (Red de Herbarios del Noroeste de México, 2020). Las fechas en las que la dirección del viento no coincidió con la presencia del taxón podrían sugerir que se trató de un aporte de granos local de plantas de ornato dentro de la ciudad o de procesos de resuspensión ligados a corrientes de turbulencias.

## VI.6. Relación del espectro polínico y la vegetación

Aunque el espectro polínico de Hermosillo estuvo dominado por cuatro taxa que difieren en su afinidad por un tipo de vegetación (Poaceae es una familia cosmopolita, Amaranthaceae y *Ambrosia* tienen afinidad con regiones áridas y semiáridas y Cupressaceae con regiones más templadas y frías), la aparición de tipos polínicos como *Agave*, *Bursera*, *Caesalpinia*, *Guaiacum coulteri*, *Larrea tridentata*, *Olneya tesota*, *Parkinsonia* y *Prosopis*, que son taxa representativos del Desierto Sonorense y, además, presentan dispersión zoófila, le dan la caracterización desértico-subtropical al espectro polínico, que permite definir una firma polínica de esta región del Desierto Sonorense. La aparición de taxa de origen templado como *Alnus*, Cupressaceae *Fraxinus*, *Pinus* y *Quercus* (aunque algunos se encuentran en la ciudad como plantas de ornato), estaría haciendo notar la vegetación de los bosques de la Sierra Madre Occidental y las sierras aisladas (archipiélago madreño) del norte de Sonora a través del transporte de larga distancia. La región del Desierto Sonorense es una transición entre vegetación de origen neártico y neotropical (Molina-Freaner y Van Devender, 2010). La mezcla de vegetación templada y subtropical de estas dos biorregiones estuvo representada en el espectro polínico de la ciudad de Hermosillo.

Se conoce que, la vegetación circundante a la zona de monitoreo tiene un gran impacto en los conteos polínicos, debido a que la mayoría del polen se dispersa localmente, muy cerca de la fuente de emisión (Skjøth *et al.*, 2013; Rojo *et al.*, 2015). En el espectro polínico de la ciudad de Hermosillo, la flora nativa local estuvo bien representada. La vegetación nativa circundante al captador de partículas está conformada por 176 especies, correspondientes a 38 familias, de las cuales Poaceae, Fabaceae, Asteraceae, Euphorbiaceae, Cactaceae y Amaranthaceae son las que tienen el mayor número de especies (**Tabla 2**). En el espectro

polínico, estos taxa, a excepción de Cactaceae, cuya polinización es muy especializada (Gorostiague y Ortega-Baes, 2015), y cuyo tamaño de polen dificulta la dispersión, tuvieron un gran aporte de granos a la atmósfera.

El espectro polínico de la ciudad registró la presencia de 37 taxa nativos de Hermosillo que se distribuyen en un radio de 5 km del captador de partículas (**Tabla 5**). Por otro lado, con base en el trabajo de Navarro-Navarro y Moreno-Vázquez (2016), al menos 12 tipos polínicos registrados en la atmósfera son especies introducidas que se encuentran como plantas de ornato dentro de la ciudad, entre ellas: *Azadirachta indica*, *Bucida buceras*, *Casuarina equisetifolia* y *Leucaena leucocephala*, etc. Otros taxa se registraron también en el espectro polínico y se sabe que se encuentran plantados en la ciudad como: Cupressaceae, *Olea europaea*, *Phoenix roebelenii* y *Pinus*, entre otros.

## **VI.7. Fenología floral**

En esta investigación se realizó un calendario de floración del año 2018, basado en la observación de plantas (nativas e introducidas) cercanas al captador de partículas (**Figura 38**). El calendario quedó compuesto por 48 taxa, de los cuales 35 se registraron dentro de los conteos polínicos. Algunos taxa de flora local próxima al captador no se registran como tipos polínicos debido a su polinización zoófila, entre ellos: *Adenium obesum*, *Bougainvillea*, Cactaceae, *Fouquieria*, *Lantana*, *Plumeria rubra* y *Tecoma stans*. De los que sí están representados en el espectro polínico, solo 12 taxa muestran una correlación significativa entre floración y registro polínico (**Tabla 10**). Lo anterior puede relacionarse con diversos factores entre los que pueden mencionarse la polinización zoófila que caracteriza a la mayoría de los taxa; la variabilidad de la dirección del viento y su efecto no predecible en la dirección de la dispersión del polen durante el período de anthesis de las flores que generan el polen; la precisión del método de muestreo de la vegetación del entorno del captador, que no permitió la observación de patios y jardines alejados de las calles; y/o los flujos de turbulencia vertical generados sobre el suelo en la capa límite atmosférica, por su calentamiento durante el día.

Hubo algunos taxa cuya floración se reflejó muy bien en los registros polínicos, como en el caso de Amaranthaceae, *Citrus*, *Guaiacum coulteri*, *Olneya tesota*, *Prosopis* y

*Washingtonia*, que presentaron valores de correlación altos, además de otros tipos polínicos con correlaciones más bajas pero significativas.

Otros autores ya han investigado la relación de los datos aerobiológicos con la fenología floral, pero de una manera más precisa. Estrella *et al.* (2006) encontraron una gran divergencia temporal entre el polen capturado de *Betula*, *Artemisia* y *Poaceae* y las fechas de floración de estos tipos polínicos, atribuida al aporte de granos de polen extra-local y a la contribución polínica de más especies (de estos tipos polínicos) que solo las contempladas en el estudio. En el caso del presente trabajo, solo se obtuvo el grado de correlación entre datos semanales de floración y conteos polínicos, por lo que los resultados no son comparables. Sin embargo, permiten un mejor análisis de la dinámica de algunos tipos polínicos.

## **VI.8. Diversidad polínica de la atmósfera**

La atmósfera de la ciudad de Hermosillo presentó una riqueza de 88 tipos polínicos en el 2018. Otros estudios en zonas áridas han reportado una riqueza polínica menor (Cariñanos *et al.*, 2004; Ahumada-Valdez *et al.*, 2009; Perveen *et al.*, 2012; 2014; Al-Nesf *et al.*, 2020). En cuanto al índice de diversidad, hay que tomar en cuenta que en el caso de los estudios aerobiológicos, la determinación polínica a la que se llega, comúnmente, no es al nivel de especie, lo que podría llevar a una subestimación del valor del índice, mientras que el transporte polínico de larga distancia (que se comprobó anteriormente) aumenta el número de tipos polínicos en la atmósfera. Considerando lo anterior, el índice de diversidad resultó ser bajo en los meses de enero y agosto a diciembre y alto de febrero a julio, siendo los meses de junio y abril los más diversos. En el calendario anual de floración (**Figura 38**) se vio que la mayoría de las plantas (incluyendo nativas e introducidas) florecieron en primavera, correspondiendo con el periodo de mayor diversidad polínica.

De acuerdo con el análisis estadístico, la diversidad (índice de diversidad) disminuyó cuando la humedad relativa era alta y aumentó cuando la humedad relativa fue baja (**Figura 37**). Esto se puede explicar desde un punto de vista fenológico. El Desierto Sonorense tiene dos picos de floración: uno en primavera y otro en verano. La temporada de floración de primavera puede abarcar desde parte de febrero hasta parte de junio, con picos en marzo y

abril, dependiendo de las lluvias y temperaturas del invierno y la estación de crecimiento. La floración de verano inicia semanas después de las primeras lluvias monzónicas y continúa hasta finales de otoño (Dimmitt, 2015c). En primavera, aunque la humedad relativa fue muy baja, también hubo floración de muchas plantas que probablemente responden a variables como el fotoperiodo y/o las temperaturas, que son desencadenantes ambientales para la floración (Bowers y Dimmitt, 1994).

Además, en el invierno previo hubo un acumulado de precipitación de 30 mm (CESAVE- SIAFESON, 2021), que pudo haber favorecido la floración de muchas plantas en primavera, viéndose representada en la diversidad polínica de esa estación. Por otra parte, las plantas que florecieron en verano-otoño, respondieron a las lluvias de verano. En ese periodo, la humedad relativa aumentó por las lluvias, efecto del monzón, pero la diversidad polínica disminuyó. Esta disminución en el valor del índice de diversidad se atribuye a que la riqueza de especies fue menor, así como la equitatividad en la abundancia relativa de estas, debido a que pocos tipos polínicos (Poaceae, Amaranthaceae y *Ambrosia*) tuvieron un aporte de granos muy grande, a diferencia de otros que presentaron InPM muy bajas.

## **VI.9. Calidad biológica del aire en Hermosillo**

Cualitativamente, el espectro polínico de la ciudad de Hermosillo incluye algunos de los tipos polínicos más importantes desde el punto de vista de la salud, por sus ya conocidos efectos en las alergias respiratorias, entre ellos: *Alnus*, Amaranthaceae, *Ambrosia*, *Artemisia*, Cupressaceae, *Olea europaea*, *Platanus*, Poaceae, *Quercus* y Urticaceae, así como otros pólenes también reconocidos como alergénicos: *Carya*, *Casuarina equisetifolia*, *Citrus*, *Fraxinus*, Moraceae, *Nerium oleander*, *Parkinsonia*, *Phoenix*, *Pinus*, *Populus*, *Punica granatum*, Rosaceae, *Salix*, *Tamarix* y *Washingtonia* (Cariñanos y Marinangeli, 2021). No obstante, el que estos tipos polínicos representen un riesgo para la salud de la población de Hermosillo dependió no solo de su potencial alergénico, sino también de su abundancia en la atmósfera (Skjøth *et al.*, 2013). Por lo tanto, considerando su capacidad alergénica y las concentraciones registradas en el año, los taxa capaces de repercutir en la salud de la población de Hermosillo fueron principalmente Poaceae, Amaranthaceae, *Ambrosia* y Cupressaceae. Tomando en cuenta la

dinámica de estos tipos polínicos, las personas sensibles a los alérgenos de Poaceae, *Ambrosia* y Cupressaceae estarían expuestas a lo largo de todo el día, mientras que las personas sensibilizadas al polen de Amaranthaceae estarían mayormente expuestas por la mañana.

De acuerdo con la Red Española de Aerobiología, la calidad biológica del aire de un sitio se puede categorizar como buena: cuando los tipos polínicos presentes en el aire se mantienen en niveles de concentración bajos; aceptable: si las concentraciones de granos de polen son bajas para la mayoría de los tipos polínicos pero alguno de ellos presenta un mayor potencial alergénico o son moderadas pero se trata de tipos polínicos de baja capacidad alergénica; regular: si las concentraciones de granos de polen de tipos con un mayor potencial alergénico se encuentran dentro de categorías moderadas, o cuando están próximas a moderadas pero están presentes al mismo tiempo dos tipos polínicos o más de elevado potencial alergénico; o mala: si alguno de los tipos de mayor potencial alergénico esté presente en concentraciones altas, o cuando existan concentraciones moderadas de dos tipos polínicos de elevado potencial alergénico de forma simultánea (Galán *et al.*, 2007). Ortega-Rosas *et al.* (2019) consideran que hay dos periodos críticos donde la calidad biológica del aire en Hermosillo es mala, estos son en verano y octubre. En el presente trabajo se determinó que la calidad biológica del aire de Hermosillo en 2018 fue mala en los meses de agosto a noviembre, debido a las altas concentraciones de Amaranthaceae, Poaceae y *Ambrosia*; y, regular en abril y diciembre por las concentraciones importantes de *Ambrosia* y Cupressaceae. En el resto del año la calidad biológica del aire se consideró aceptable.

## VII. CONCLUSIONES

Poaceae, Amaranthaceae, *Ambrosia* y Cupressaceae son los tipos polínicos más abundantes de la atmósfera de la ciudad de Hermosillo en el año 2018.

La estación polínica de Poaceae y Amaranthaceae se presenta desde finales de verano hasta finales de otoño; *Ambrosia* tiene dos estaciones polínicas, una en primavera y la otra en otoño; la estación polínica de Cupressaceae es en invierno.

Poaceae, *Ambrosia* y Cupressaceae muestran un patrón semidiurno irregular, presentando altas concentraciones de granos de polen algunos días en la mañana y otros días en la tarde. La dinámica de Amaranthaceae es más homogénea, con un mayor aporte de granos de polen por la mañana.

Las concentraciones de Amaranthaceae en la primera mitad del día se correlacionan positivamente con la temperatura y la radiación solar; las de Poaceae negativamente con la humedad relativa y positivamente con la velocidad del viento; las de *Ambrosia* negativamente con la dirección del viento. Las concentraciones de Amaranthaceae en la segunda parte del día se correlacionan positivamente con la temperatura y las de *Ambrosia* con la humedad relativa y negativamente con la velocidad del viento.

En general, las altas temperaturas y la humedad relativa favorecen las concentraciones diarias de granos de polen y la dirección del viento las afecta negativamente.

Se estableció un calendario anual de floración de plantas nativas e introducidas cercanas al captador.

Pocas taxa dentro del calendario anual de floración en el entorno del punto de muestreo, tienen bien representada su fenología floral en los conteos polínicos.

Gran parte del espectro polínico representa cualitativamente a la vegetación nativa local. En menor medida se representa la vegetación introducida de la ciudad, y otra parte representa la flora nativa de Sonora, que llega a través del transporte polínico de larga distancia. Esto último se comprobó mediante las retro-trayectorias de vientos.

El registro de taxa representativos del Desierto Sonorense le da la distinción de desértico-subtropical al espectro polínico de la ciudad de Hermosillo.

La atmósfera de la ciudad de Hermosillo en 2018 tiene una riqueza de 88 tipos polínicos.

El índice de diversidad es mayor en los meses de primavera, coincidiendo con los meses más secos. En los meses más húmedos el índice de diversidad tiende a disminuir.

La calidad biológica del aire de la ciudad de Hermosillo es mala en los meses de agosto a noviembre por las altas concentraciones de granos de polen de tipos polínicos con alto potencial alergénico.

## VIII. RECOMENDACIONES

En vista de que los estudios aerobiológicos de series de tiempo en otras regiones han mostrado variabilidad interanual en relación con la dinámica polínica atmosférica, y bajo el contexto de Cambio Climático, que augura cambios en la temporalidad y severidad de las estaciones polínicas, se recomienda continuar con el monitoreo continuo de la atmósfera de Hermosillo.

Llevar a cabo más estudios donde se visualice la dinámica semidiurna o intradiurna de los tipos polínicos de interés, con el fin de determinar si el comportamiento encontrado en este estudio fue solo puntual o se repite anualmente. Esto tendría mucha aplicabilidad en el ámbito de las alergias respiratorias.

Dar seguimiento a tipos polínicos que tuvieron un aporte considerable de granos de polen a la atmósfera como *Phoenix roebelenii*, *Prosopis* y *Parkinsonia*, ya que están reconocidos como alergénicos y eventualmente podrían representar un riesgo para la salud de la población.

## IX. LITERATURA CITADA

- Abayomi, E. A. 2013. HIV/AIDS Disease Burden Complex in South Africa: Impact on Health and Environmental Resources, and Vulnerability to Climate, 125-143 p. En: Pielke, R.A. (Ed.), *Climate Vulnerability*. Elsevier. Massachusetts, United States of America
- Aboulaich, N., L. Achmakh, H. Bouziane, M. M. Trigo, M. Recio, M. Kadiri, B. Cabezudo, H. Riad y M. Kazzaz. 2013. Effect of meteorological parameters on Poaceae pollen in the atmosphere of Tetouan (NW Morocco). *International Journal of Biometeorology* 57(2): 197-205.
- Acosta-Murrieta, M. A. 2021. Comportamiento intradiario del polen atmosférico de Hermosillo y su correlación con variables meteorológicas (verano-otoño 2018). Memoria profesional. Universidad de la Sierra. Moctezuma, Sonora, México.
- Agashe, S., y Caulton, E. 2009. *Pollen and Spores: Applications with Special Emphasis on Aerobiology and Allergy*. Science Publishers. New Hampshire, United States of America
- Al-Nesf, M. A., D. Gharbi, H. M. Mobayed, B. R. Dason, R. Mohammed Ali, S. Taha, A. Tuffaha, M. Adeli, H. A. Sattar y M. D. M. Trigo. 2020. The association between airborne pollen monitoring and sensitization in the hot desert climate. *Clinical and Translational Allergy* 10(1): 1-11.
- Alba-Sánchez, F. 1997. Caracterización polínica de la atmósfera de Granada: relación con las variables meteorológicas y modelos predictivos de los taxones más alergógenos. Tesis de Doctorado. Universidad de Granada. Granada, España.
- Ahrens, C. D. 2001. *Essentials of meteorology: an invitation to the atmosphere*. Brooks/Cole. California, United States of America.
- Ahumada-Valdez, S., M. Quintero-Núñez, O. R. García-Cueto y R. Venegas. 2009. Annual study of airborne pollen in Mexicali, Baja California, México. *WIT Transactions on Ecology and the Environment* 123: 173-182.
- Ahumada-Valdez, S., M. Quintero-Núñez, P. G. Núñez-Pérez y M. Bocanegra-Olmos. 2006. La contaminación por partículas de polen y esporas en Mexicali: construcción de un mapa polínico. *Contaminación y Medio Ambiente en Mexicali* 4: 101-123.
- Arobba, D., M. A. Guido, P. Minale, C. Montanari, S. Placereani, S. Pracilio, C. Troise, S. Voltolini y A. C. Negrini. 2000. Airborne pollen in Genoa (NW-Italy): a comparison between two pollen-sampling stations. *Aerobiologia* 16(2): 233-243.
- Arruda Moreira, G. 2018. Studying the planetary boundary layer from remote sensing systems. Tesis de Doctorado. Universidad de Granada. Departamento de Física Aplicada. Granada, España.
- Axelrod, D. I. 1979. *Age and Origin of Sonoran Desert Vegetation*. California Academy of Sciences. California, United States of America.

- Barry, G. R. y Chorely, R. J. 2003. *Atmosphere, Weather and Climate*. Routledge. London, United Kingdom.
- Behbehani, N., N. Arifhodzic, M. Al-Mousawi, S. Marafie, L. Ashkanani, M. Moussa y A. Al-Duwaisan. 2004. The seasonal variation in allergic rhinitis and its correlation with outdoor allergens in Kuwait. *International archives of allergy and immunology* 133(2): 164-167.
- Belmonte, J., E. Cuevas, P. Poza, R. González, J. M. Roure, R. Puigdemunt, S. Alonso-Pérez y F. Grau. 2010. *Aerobiología y alergias respiratorias de Tenerife*, Madrid: Agencia Estatal de Meteorología. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- Belmonte, J. y J. M. Roure. 2002. Introducción, 7-16 p. En: Valero Santiago A. L. y Cadahía García, A. (Eds.), *Polinosis: Polen y Alergia*. mra ediciones. España.
- Belmonte, J., J. M. Roure y X. March. 1998. Aerobiology of Vigo, North-Western Spain: atmospheric pollen spectrum and annual dynamics of the most important taxa, and their clinical importance for allergy. *Aerobiologia* 14(2): 155-163.
- Benninghoff, W. S. 1991. Aerobiology and its significance to biogeography and ecology. *Grana* 30(1): 9-15.
- Bowers, J. E., y M. A. Dimmitt. 1994. Flowering phenology of six woody plants in the northern Sonoran Desert. *Bulletin of the Torrey Botanical Club* 121(3): 215-229.
- Brito-Castillo, L., M. A. Crimmins y S. C. Díaz. 2010. Clima, 73-96 p. En: Molina-Freaner, F. E. y Van Devender, T. R. (Eds.), *Diversidad biológica de Sonora*. Universidad Nacional Autónoma de México. Distrito Federal, México.
- Bronillet-Tarragó, I. 1996. An annual study of airborne pollen in northern Mexico City. *Aerobiologia* 12: 191-195.
- Bustamante, E. y A. Búrquez. 2008. Effects of plant size and weather on the flowering phenology of the organ pipe cactus (*Stenocereus thurberi*). *Annals of botany* 102(6): 1019-1030.
- Caballero, M., S. Lozano y B. Ortega. 2007. Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra. *Revista digital universitaria* 8(10): 2-12.
- Calderón-Ezquerro, M. C., C. Guerrero-Guerra, B. Martínez-López, F. Fuentes-Rojas, F. Téllez-Unzueta, E. D. López-Espinoza, M. E. Calderón-Segura, A. Martínez-Arroyo y M. M. Trigo-Pérez. 2016. First airborne pollen calendar for Mexico City and its relationship with bioclimatic factors. *Aerobiologia* 32(2): 225-244.
- Calderon-Ezquerro, M. C., C. Guerrero-Guerra, C. Galán, N. Serrano-Silva, G. Guidos-Fogelbach, M. C. Jiménez-Martínez, D. Larenas-Linnemanne, E.D. López Espinosaa y J. Ayala-Balboa. 2018. Pollen in the atmosphere of Mexico City and its impact on the health of the pediatric population. *Atmospheric Environment* 186: 198-208.
- Cariñanos, P., C. Galan, P. Alcázar y E. Dominguez. 2004. Airborne pollen records response to climatic conditions in arid areas of the Iberian Peninsula. *Environmental and Experimental Botany* 52(1): 11-22.

- Cariñanos, P. y F. Marinangeli. 2021. An updated proposal of the Potential Allergenicity of 150 ornamental Trees and shrubs in Mediterranean Cities. *Urban Forestry & Urban Greening* 63, 127218.
- Carmona, V. y T. Carmona. 2013. La diversidad de los análisis de diversidad. *Bioma* 14: 20-28.
- Cecchi L, M. Morabito, M. P. Domeneghetti, A. Crisci, M. Onorari y S. Orlandini. 2006. Long distance transport of ragweed pollen as a potential cause of allergy in central Italy. *Annals of Allergy, Asthma & Immunology* 96(1): 86-91.
- Cervigón-Morales, P., M. Gutiérrez-Bustillo y R. Pérez- Badia. 2016. Aerobiología y salud. *Revista de Salud Ambiental* 16(1): 1-5.
- CESAVE-SIAFESON. 2020. Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas de Sonora. CESAVE-SIAFESON. 2021. Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas de Sonora, 2014-2017. [www.siafeson.com/remas](http://www.siafeson.com/remas). Acceso noviembre 18, 2021.
- Chen, D. y H. W. Chen. 2013. Using the Köppen classification to quantify climate variation and change: An example for 1901–2010. *Environmental Development* 6:69-79.
- Cid-Martínez, M. A. 2007. Estacionalidad de granos de polen en dos zonas de la Ciudad de México. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. México, DF.
- Cruz-Campas, M. E., A. Gómez-Álvarez, M. Quintero-Núñez y J. Varela-Salazar. 2013. Evaluación de la calidad del aire respecto de partículas suspendidas totales (PST) y metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr) en la Ciudad de Hermosillo, Sonora, México, durante un periodo anual. *Revista internacional de contaminación ambiental* 29(4): 269-283.
- Dahl, Å., C. Galán, L. Hajkova, A. Pauling, B. Sikoparija, M. Smith y D. Vokou. 2013. The Onset, Course and Intensity of the Pollen Season, 29-70 p. En: Sofiev M. y Bergmann, K. C. (Eds.), *Allergenic Pollen: A Review of the Production, Release, Distribution and Health Impacts*. Springer Science + Business Media Dordrecht. The Netherlands.
- Dales, R. E., S. Cakmak, S. Judek, T. Dann, F. Coates, J. R. Brook y R. T. Burnett. 2004. Influence of outdoor aeroallergens on hospitalization for asthma in Canada. *Journal of Allergy and Clinical Immunology* 113(2): 303-306.
- D'amato, G., L. Cecchi, S. Bonini, C. Nunes, I. Annesi-Maesano, H. Behrendt, G. Liccardi, T. Popov y P. Van Cauwenberge. 2007. Allergenic pollen and pollen allergy in Europe. *Allergy* 62(9): 976-990.
- de la Fuente-Ruiz, R.A., G. Tirado-Arias y M. Quintero-Núñez. 2013. La educación ambiental: una contribución en la solución del problema de contaminación atmosférica. Universidad Pedagógica Nacional. Baja California, México.
- de Weerd, N. A., P. L. Bhalla y M. B. Singh. 2002. Aeroallergens and pollinosis: Molecular and immunological characteristics of cloned pollen allergens. *Aerobiologia* 18(2): 87-106.
- De Weger, L.A., K. C. Bergmann, A. Rantio-Lehtimäki, Å. Dahl, J. Buters, C. Déchamp, J. Belmonte, M. Thibaudon, L. Cecchi, J. P. Besancenot, C. Galán y Y. Waisel. 2013.

- Impact of pollen, 161-215 p. En: Sofiev M. y Bergmann, K. C. (Eds.), *Allergenic Pollen: A Review of the Production, Release, Distribution and Health Impacts*. SpringerScience + Business Media Dordrecht. The Netherlands.
- Dimmitt, M. A. 2015a. Biomes and communities of the Sonoran Desert Region, 5-19 p. En: Dimmitt, M. A., Wentworth Comus, P y Brewer, L. M. (Eds.), *A natural history of the Sonoran Desert*. Arizona-Sonora Desert Museum Press. Arizona, United States of America.
- Dimmitt, M. A. 2015b. Flowering plants of the Sonoran Desert, 157-239 p. En: Dimmitt, M. A., Wentworth Comus, P y Brewer, L. M. (Eds.), *A natural history of the Sonoran Desert*. Arizona-Sonora Desert Museum Press. Arizona, United States of America.
- Dimmitt, M. A. 2015c. Plant Ecology of the Sonoran Desert Region, 139-156 p. En: Dimmitt, M. A., Wentworth Comus, P y Brewer, L. M. (Eds.), *A natural history of the Sonoran Desert*. Arizona-Sonora Desert Museum Press. Arizona, United States of America.
- Emberlin, J. 1994. The effects of patterns in climate and pollen abundance on allergy. *Allergy* 49: 15-20.
- Emberlin, J., M. Savage y S. Jones. 1993. Annual variations in grass pollen seasons in London 1961–1990: trends and forecast models. *Clinical & Experimental Allergy* 23(11): 911-918.
- Espinoza-Vizcaíno, R. 2009. Alergias en Sonora. *Buena Salud* 116(12): 32-33.
- Estrella, N., A. Menzel, U. Krämer y H. Behrendt. 2006. Integration of flowering dates in phenology and pollen counts in aerobiology: analysis of their spatial and temporal coherence in Germany (1992–1999). *International Journal of Biometeorology* 51(1): 49-59.
- Fernández-Rodríguez, S., R. Tormo-Molina, J. M. Maya-Manzano, I. Silva-Palacios y A. Gonzalo-Garijo. 2014. Comparative study of the effect of distance on the daily and hourly pollen counts in a city in the south-western Iberian Peninsula. *Aerobiologia* 30(2): 173-187.
- Fernstrom, A. y M. Goldblatt. 2013. Aerobiology and its role in the transmission of infectious diseases. *Journal of pathogens* 2013: 1-13.
- Frei, T. 1998. The effects of climate change in Switzerland 1969-1996 on airborne pollen quantities from hazel, birch and grass. *Grana* 37: 172-9.
- Galán, C., A. Ariatti, M. Bonini, B. Clot, B. Crouzy, A. Dahl, D. Fernandez-González, G. Frenguelli, R. Gehrig, S. Isard, E. Levetin, D. W. Li, P. Mandrioli, C. A. Rogers, M. Thibaudon, I. Sauliene, C. Skjoth, M. Smith y M. Sofiev. 2017. Recommended terminology for aerobiological studies. *Aerobiologia* 33(3): 293-295.
- Galán, C., P. Cariñanos-González, P. Alcázar-Teno y E. Domínguez-Vilches. 2007. *Manual de calidad y gestión de la Red Española de Aerobiología*. Universidad de Córdoba. España.
- Galán, C., R. Tormo, J. Cuevas, F. Infante y E. Domínguez. 1991. Theoretical daily variation patterns of airborne pollen in the southwest of Spain. *Grana* 30(1): 201-209.

- García, E. 1966. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía-UNAM. Distrito Federal, México.
- García-Mozo, H. 2011. The use of aerobiological data on agronomical studies. *Ann Agric Environ Med* 18: 159–164.
- García-Mozo, H., R. Pérez-Badía, F. Fernández-González y C. Galán. 2006. Airborne pollen sampling in Toledo, central Spain. *Aerobiologia* 22(1): 55-66.
- Gioulekas, D., C. Balafoutis, A. Damialis, D. Papakosta, G. Gioulekas y D. Patakas. 2004. Fifteen years' record of airborne allergenic pollen and meteorological parameters in Thessaloniki, Greece. *International Journal of Biometeorology* 48: 128-136.
- González-Lozano, M.C., A. Cerezo-Moreno, M. C. González- Macías y Salazar-Coria, L. 1999. Comportamiento de las partículas suspendidas y polen en la atmósfera de la región norte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Journal of the Mexican Chemical Society* 43: 155–164.
- González-Parrado, Z., D. Fernández-González, A. M. Vega-Maray y R. M. Valencia-Barrera. 2015. Relationship between flowering phenology, pollen production and atmospheric pollen concentration of *Plantago lanceolata* (L.). *Aerobiologia*, 31(4): 481-498.
- Gorostiague, P. y P. Ortega-Baes. 2015. How specialised is bird pollination in the Cactaceae? *Plant Biology* 18(1): 63-72.
- Guerreiro, C., A. Ortiz, F. de Leeuw y M. Viana. 2018. Air Quality in Europe-2018 Report; Publications Office of the European Union.
- Guerreiro, C., S. Larssen, F. de Leeuw y V. Foltescu. 2011. Air Quality in Europe: 2011 Report. Publications Office of the European Union.
- Gutiérrez, M., S. Sabariego y P. Cervigón. 2006. Calendario polínico de Madrid (Ciudad Universitaria). Periodo 1994-2004. *Lazaroa* 27(21).
- Gutiérrez-Bustillo, A., Z. Ferencova, A. Núñez Niebla, A. Alcamí, P. Campoy Cervera, R. Guantes y D. Moreno. 2016. Análisis por técnicas morfológicas y secuenciación de ADN del polen atmosférico de la Comunidad de Madrid: estudios preliminares. *Revista de Salud Ambiental* 16(16): 71–77.
- Halwagy, M. H. 1994. Airborne Pollen of Kuwait City, Kuwait, 1975–1987. *Grana* 33(6): 333-339. doi:10.1080/00173139409429021.
- Hasnain, S. M., K. Fatima, A. Al-Frayh y S. T. Al-Sedairy. 2005. One-year pollen and spore calendars of Saudi Arabia Al-Khobar, Abha and Hofuf. *Aerobiologia* 21(3): 241-247.
- Hernández-Pérez, J. L. 2012. Los cambios en el patrón de cultivos en Sonora a partir del proceso de reestructuración agrícola en México: el caso de la Costa de Hermosillo. Tesis de Maestría. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Coordinación de Desarrollo Regional. Hermosillo, Sonora, México.
- Ianovici, N., C. B. Panaitescu y I. Brudiu. 2013. Analysis of airborne allergenic pollen spectrum for 2009 in Timișoara, Romania. *Aerobiologia* 29(1): 95-111.

- Instituto Nacional de Ecología (INE). 2010. Manual 1. Principios de la medición de la Calidad del aire, México. <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/1-%20Principios%20de%20Medici%C3%B3n%20de%20la%20Calidad%20del%20Air%20e.pdf>. Acceso enero 21, 2020.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2017. Anuario estadístico y geográfico de Sonora 2017.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2021. Censo de Población y Vivienda 2020.
- Jäger, S., S. Nilsson, B. Berggren, A.M. Pessi, M. Helander y H. Ramfjor. 1996. Trends of some airborne tree pollen in the Nordic countries and Austria, 1980-1993. *Grana* 35(3): 171-178.
- Jato, V., F. Rodríguez-Rajo, P. Alcázar, P. De Nuntiiis, C. Galán y P. Mandrioli. 2006. May the definition of pollen season influence aerobiological results?. *Aerobiologia* 22(13): 13-25.
- Kasprzyk, I. y A. Walanus. 2010. Description of the main Poaceae pollen season using bi-Gaussian curves, and forecasting methods for the start and peak dates for this type of season in Rzeszów and Ostrowiec Św.(SE Poland). *Journal of Environmental Monitoring* 12(4): 906-916.
- Kasprzyk, I., K. Harmata, D. Myszkowska, A. Stach y D. Stępalska. 2001. Diurnal variation of chosen airborne pollen at five sites in Poland. *Aerobiologia* 17(4): 327-345.
- Katelaris, C. H. y P. J. Beggs. 2017. Climate change: allergens and allergic diseases. *Internal medicine journal* 48(2): 129-134.
- Katelaris, C. H., T. V. Burke y K. Byth. 2004. Spatial variability in the pollen count in Sydney, Australia: can one sampling site accurately reflect the pollen count for a region?. *Annals of Allergy, Asthma & Immunology* 93(2): 131-136.
- Köppen, W. 1900. Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugsweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt. *Geographische Zeitschrift* 6: 657-679.
- Lacey, J. 1996. Spore dispersal-its role in ecology and disease: the British contribution to fungal aerobiology. *Mycological research* 100(6): 641-660.
- Lacey, M. E. y J. S. West. 2006. *The air spora: a manual for catching and identifying airborne biological particles*. Springer Science & Business Media. Dordrecht, The Netherlands.
- Laín, C. S. y A. M. G. Bustillo. 1982. El contenido polínico de la atmósfera de Madrid. *Anales del Jardín Botánico de Madrid* 39(2):433-463.
- Lo, F., C. M. Bitz, D. S. Battisti y J. J. Hess. 2019. Pollen calendars and maps of allergenic pollen in North America. *Aerobiologia* 35(4): 613-633.
- López-Romero C., J. Huerta-Romero, M. Frías-Mendivil. 2017. Sensibilización a alérgenos en pacientes pediátricos mayores de 2 años en el Hospital Infantil del Estado de Sonora. *Bol Clin Hosp Infant Edo Son* 34(2): 90-96.

- Luo, Y. y X. Zhou. 2006. Processes of CO<sub>2</sub> Transport from Soil to the Atmosphere, 61-76 p. En: Luo, Y. y Zhou, X. (Eds.), Soil Respiration and the Environment. Elsevier, California, United States of America.
- Makra, L., M. Juhász, J. Mika, A. Bartzokas, R. Béczi y Z. Sümegehy. 2007. Relationship between the Péczely's large-scale weather types and airborne pollen grain concentrations for Szeged, Hungary, Grana 46(1): 43-56.
- Makra, L., M. Juhász, R. Béczi y E. K. Borsos. 2005. The history and impacts of airborne Ambrosia (Asteraceae) pollen in Hungary. Grana 44(1): 57-64.
- Mandrioli, P. y A. Ariatti. 2001. Aerobiology: future course of action. Aerobiologia 17(1): 1-10.
- Marceau, A., B. Loubet, B. Andrieu, B. Durand, X. Foueillassar y L. Huber. 2011. Modelling diurnal and seasonal patterns of maize pollen emission in relation to meteorological factors. Agricultural and Forest Meteorology 151(1): 11-21.
- Margalef, R. 1972. Homage to E. Hutchison, or why is there an upper limit to diversity. Transactions of the Connecticut Academy of Arts and Sciences 44: 21-235.
- Martínez-Yrizar, A., R. S. Felger y A. Búrquez. 2010. Los ecosistemas terrestres: un diverso capital natural, 129-156 p. En: Molina-Freaner, F. E. y Van Devender, T. R. (Eds.), Diversidad biológica de Sonora. Universidad Nacional Autónoma de México. Distrito Federal, México.
- Matyasovszky, I., L. Makra, Z. Csépe, Á. J. Deák, E. Pál-Molnár, A. Fülöp y G. Tusnády. 2015. A new approach used to explore associations of current Ambrosia pollen levels with current and past meteorological elements. International journal of biometeorology 59(9): 1179-1188.
- Melgar, M., M. M. Trigo, M. Recio, S. Docampo, J. García-Sánchez y B. Cabezudo. 2012. Atmospheric pollen dynamics in Münster, north-western Germany: a three-year study (2004–2006). Aerobiologia 28(4): 423-434.
- Meza-Figueroa, D., M. De la O-Villanueva y M. L. De la Parra. 2007. Heavy metal distribution in dust from elementary schools in Hermosillo, Sonora, México. Atmospheric Environment 41(2): 276-288.
- Molina-Freaner, F. E. y T. R. Van Devender. 2010. Diversidad biológica de Sonora. Universidad Nacional Autónoma de México. Distrito Federal, México.
- Molina, L., y Molina, M. J. (Eds.). 2002. Air Quality in the Mexico Megacity: An Integrated Assessment. Springer Science & Business Media. Massachusetts, United States of America
- Montes-Montes, J. y V. Cisneros-Pérez. 1982. Los pólenes atmosféricos de la ciudad de México, DF. Alergia 29: 51–60.
- Moreno-Sarmiento, M. 2016. Estudio aerobiológico de la atmósfera de Cd. Obregón y Hermosillo (Sonora, México): Relación con las condiciones meteorológicas y repercusión en síntomas alérgicos. Tesis de Doctorado. Universidad de Sonora.

Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas. Hermosillo, Sonora, México.

- Moreno-Sarmiento, M., M. C. Peñalba, J. Belmonte, I. Rosas-Pérez, M. M. Ortega-Nieblas, M. Villa-Ibarra, F. Lares-Villa y L. J. Pizano-Nazara, 2016a. Urban airborne pollen in a semiarid environment. *Aerobiologia* 32(2): 363-370.
- Moreno-Sarmiento, M., M. C. Peñalba, J. Belmonte, I. Rosas-Pérez, C. Lizarraga-Celaya, M. M. Ortega-Nieblas, M. Villa-Ibarra, F. Lares-Villa, F. y L. J. Pizano-Nazara. 2016b. Airborne fungal spores from an urban locality in southern Sonora, Mexico. *Revista Mexicana de Micología* 44: 11-20.
- Muñoz, A. F., I. Silva Palacios y R. Tormo Molina. 2010. Influence of meteorological parameters in hourly patterns of grass [Poaceae] pollen concentrations. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine* 17(1): 87-100.
- Navarro-Navarro, L.A. y J.L. Moreno-Vázquez. 2016. Cambios en el paisaje arbolado en Hermosillo: escasez de agua y plantas nativas. *Región y sociedad* 28(67): 79-120.
- Núñez, A., G. Amo de Paz, A. Rastrojo, A. M. García, A. Alcamí, A. M. Gutiérrez-Bustillo y D. A. Moreno. 2016. Monitoring of airborne biological particles in outdoor atmosphere. Part 1: Importance, variability and ratios. *International Microbiology* 19(1): 1-13.
- O'Rourke M. K. 1986. The implications of atmospheric pollen rain for fossil pollen profiles in the arid southwest. Tesis de doctorado. University of Arizona, Tucson, Arizona.
- O'Rourke, M. K. 1990. Pollen reentrainment: contributions to the pollen rain in an arid environment. *Grana* 29(2): 147-151.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). 2006. Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre.
- Ortega-Rosas, C. I., D. Meza-Figueroa, J. R. Vidal-Solano, B. González-Grijalva y B. Schiavo. 2020a. Association of airborne particulate matter with pollen, fungal spores, and allergic symptoms in an arid urbanized area. *Environmental Geochemistry and Health* 43(5): 1761-1782.
- Ortega-Rosas, C. I., C. A. Enciso-Miranda, A. Macías-Duarte, D. Morales-Romero y L. Villarruel-Sahagún. 2020b. Urban vegetation cover correlates with environmental variables in a desert city: Insights of mitigation measures to climate change. *Urban Ecosystems* 23(6): 1191-1207.
- Ortega-Rosas, C. I., M. C. Calderón-Ezquerro y O. G. Gutiérrez-Ruacho. 2019. Fungal spores and pollen are correlated with meteorological variables: effects in human health at Hermosillo, Sonora, Mexico. *International Journal of Environmental Health Research* 30(6): 677-695.
- Pérez-Badía, R., A. Rapp, C. Vaquero, F. Fernández-González. 2011. Aerobiological study in east-central Iberian Peninsula: pollen diversity and dynamics for major taxa. *Ann Agric Environ Med* 18(1): 99-111.
- Perveen, A., M. Khan y S. Zeb. 2012. Identification and quantification of airborne pollen from Hyderabad: Tando-Jam, Sindh. *Pakistan Journal of Botany* 44(5): 1755-1762.

- Perveen, A., S. Zeb, M. Khan y M. Qaiser. 2014. Seasonal fluctuations of airborne pollen grains count and its correlation with climatic factors from Khairpur, Sindh, Pakistan. *Pak. J. Bot* 46(1): 299-306.
- Pielke, R. A. y B. P. Hayden. 2016. Planetary boundary layer. *Encyclopedia Britannica*. Update November 16, 2016. (<https://www.britannica.com/science/planetary-boundary-layer>). Acceso agosto 13, 2021.
- Pla, L. 2006. Biodiversidad: Inferencia basada en el índice de Shannon y la riqueza. *Interciencia* 31(8): 583-590.
- Ponce-Caballero, C., I. M. Cerón-Palma, M. López-Pacheco, M. Gamboa-Marrufo y C. Quintal-Franco. 2010. Indoor-outdoor fungal-aerosols ratios of domestic homes in Merida, Mexico. *Ingeniería* 14(3): 169-175.
- Ponce-Caballero, C., M. Gamboa-Marrufo, M. López-Pacheco, I. Cerón-Palma, C. Quintal-Franco, G. Giacomán-Vallejos y J. A. Loría-Arcilla. 2013. Seasonal variation of airborne fungal propagules indoor and outdoor of domestic environments in Mérida, Mexico. *Atmósfera* 26(3): 369-377.
- Puc, M. y M. I. Puc. 2004. Allergenic airborne grass pollen in Szczecin, Poland. *Ann Agric Environ Med* 11(2): 237-244.
- Ramírez-Leal, R., H. Esparza-Ponce y A. Duarte-Moller. 2007. Characterization of inorganic atmospheric particles in air quality program with SEM, TEM and XAS. *Revista mexicana de física* 53: 102-107.
- Ramírez-Leal, R., H. Esparza-Ponce, A. Varela-Sortillón, A. Astorga-Reyes y A. Roman-B. 2009. Elemental Chemical Composition, Size and Morphological Characterization of Individual Atmospheric Particles Within an Air Quality Program. *Microscopy and Microanalysis* 15(S2): 1300-1301. doi:10.1017/S1431927609095841
- Rasmussen, A. 2002. The effects of climate change on the birch pollen season in Denmark. *Aerobiologia* 18: 253-265.
- Recio, M., S. Docampo, J. García-Sánchez, M. M. Trigo, M. Melgar y B. Cabezudo. 2010. Influence of temperature, rainfall and wind trends on grass pollination in Malaga (western Mediterranean coast). *Agricultural and Forest Meteorology* 150(7-8): 931- 940.
- Red de Herbarios del Noroeste de México. 2020. <http://herbanwmex.net/portal/checklists/dynamicmap.php?interface=checklist>. Acceso junio 15, 2020.
- Red de Herbarios del Noroeste de México. 2021. <https://herbanwmex.net/portal/index.php>. Acceso marzo 17, 2021.
- Red Española de Aerobiología. 2021. [https://www.uco.es/rea/?page\\_id=262](https://www.uco.es/rea/?page_id=262). Acceso noviembre 11, 2021.
- Red Mexicana de Aerobiología. 2021. <http://rema.atmosfera.unam.mx/rema/rema.aspx>. Acceso septiembre 21, 2021.

- Ribeiro, H., M. Cunha e I. Abreu. 2003. Airborne pollen concentration in the region of Braga, Portugal, and its relationship with meteorological parameters. *Aerobiologia* 19(1): 21-27.
- Ribeiro, H., M. Oliveira e I. Abreu. 2008. Intradurnal variation of allergenic pollen in the city of Porto (Portugal). *Aerobiologia* 24(3): 173.
- Rocha-Estrada, A., M. A. Alvarado-Vázquez, J. L. Hernández-Piñero, D. D. de León-Alanís y M. A. Guzmán-Lucio. 2013. Diversidad polínica en la atmósfera del área metropolitana de Monterrey, NL, octubre 2004 a marzo 2005. *Revista mexicana de biodiversidad* 84(4): 1063-1069.
- Rocha-Estrada, A., M. A. Alvarado-Vázquez, R. Foroughbakhch Pournavab y J. L. Hernández-Piñero. 2009. Polen atmosférico de importancia alergológica en el área metropolitana de Monterrey (Nuevo León, México), durante el periodo marzo 2003-febrero 2005. *Polibotánica* (28): 191-212.
- Rodríguez De La Cruz, D., E. Sánchez-Reyes y J. Sánchez-Sánchez. 2012. Analysis of ChenopodiaceaeAmaranthaceae airborne pollen in Salamanca, Spain. *Turkish Journal of Botany* 36: 336-343.
- Rojo, J., A. Rapp, B. Lara, F. Fernández-González y R. Pérez-Badia. 2015. Effect of land uses and wind direction on the contribution of local sources to airborne pollen. *Science of the total environment* 538: 672-682.
- Rojo, J., A. Rapp, B. Lara, S. Sabariego, F. Fernández-González y R. Pérez-Badia. 2016. Characterisation of the airborne pollen spectrum in Guadalajara (central Spain) and estimation of the potential allergy risk. *Environmental monitoring and assessment* 188(3): 130.
- Rojo, J., R. Rivero, J. Romero-Morte, F. Fernández-González y R. Pérez-Badia. 2017. Modeling pollen time series using seasonal-trend decomposition procedure based on LOESS smoothing. *International journal of biometeorology* 61(2): 335-348.
- Saha, K. 2008. *The Earth's atmosphere: Its Physics and Dynamics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Texas, United States of America
- Sahney, M. y S. Chaurasia. 2008. Seasonal variations of airborne pollen in Allahabad, India. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine* 15(2): 287-293.
- Salazar-Coria, L. 1995. Estudio anual de polen atmosférico en la zona sur de la Ciudad de Mexico. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. México, DF.
- Salazar-Mallén, M. 1949. Estudio de los pólenes en la atmósfera de la ciudad de México. *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural* 1(3): 147-164.
- Sánchez-Escalante, J. J., T. R. Van Devender, R. S. Felger, A. L. Reina-Guerrero, B. T. Wildery A. Búrquez-Montijo. 2021. Plantas vasculares del municipio de Hermosillo, Sonora, México. En preparación.
- Sanchez Escalante, J. J. 2018. Lista preliminar de plantas de la Laguna La Saucedá, Hermosillo, Sonora, México.

<https://www.herbanwmex.net/portal/checklists/checklist.php?cl=4717>. Acceso noviembre, 11, 2021.

- Shannon, C. E. y W. Weaver. 1949. *The mathematical theory of communication*. University of Illinois Press. Illinois, United States of America.
- Shreve, F. 1951. *Vegetation of the Sonoran Desert*. Carnegie Institution of Washington. Washington, D.C., United States of America.
- Shreve, F. y I. A. Wiggins. 1964. *Vegetation and Flora of the Sonoran Desert*. Stanford University Press. California, United States of America.
- Skjøth, C. A., B. Šikoparija, S. Jager y EAN-Network. 2013. Pollen Sources, 9-27 p. En: Sofiev M. y Bergmann, K. C. (Eds.), *Allergenic Pollen: A Review of the Production, Release, Distribution and Health Impacts*. Springer Science + Business Media Dordrecht. The Netherlands.
- Solomon, S., G. K. Plattner, R. Knutti, y P. Friedlingstein. 2009. Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *Proceedings of the national academy of sciences* 106(6): 1704-1709.
- Stein, A. F., R. R. Draxler, G. D. Rolph, B.J. B. Stunder, M. D. Cohen. y F. Ngan. 2015. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bulletin American Meteorological Society* 96: 2059-2077.
- Stennett, P. J. y P. J. Beggs. 2004. Pollen in the atmosphere of Sydney, Australia, and relationships with meteorological parameters. *Grana* 43(4): 209-216.
- Stensrud, D.J., M.C. Coniglio, K.H. Knopfmeier y A.J. Clark. 2015. Model Physics Parameterization, 167-180 p. En: North, G.R., Pyle, J. y Zhang, F. (Eds.), *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- Stensrud, D.J., R.L. Gall, S.L. Mullen, K.W. Howard. 1995. Model Climatology of the Mexican Monsoon. *Journal of Climate* 8: 1775-1794.
- Terán, L. M., M. M. M. Haselbarth-López y D. L. Quiroz-García. 2009. Alergia, pólenes y medio ambiente. *Gaceta médica de México* 145(3): 215-222.
- Tosunoglu, A. y A. Bicakci 2015. Seasonal and intradiurnal variation of airborne pollen concentrations in Bodrum, SW Turkey. *Environmental monitoring and assessment* 187(4): 1-21.
- Tosunoglu, A., M. K. Anoglu, A. Bicakci, O. Kilic, T. Gonca, I. Yilmazer, G. Saatcioglu, A. Akkaya, S. Celenk, Y. Canitez, H. Malyer y N. Sapan. 2015. Atmospheric pollen concentrations in Antalya, South Turkey. *Aerobiologia* 31(1): 99-109.
- Trigo, M. D. M., M. Recio, F. J. Toro y B. Cabezudo. 1997. Intradiurnal fluctuations in airborne pollen in Málaga (S. Spain): A quantitative method. *Grana* 36(1): 39-43.
- Turner, R. M., R. H. Webb, J. E. Bowers y J. R. Hastings. 2003. *The changing mile revisited: an ecological study of vegetation change with time in the lower mile of an arid and semiarid region*. University of Arizona Press. Arizona, United States of America.

- Uguz, U., A. Guvensen y N. S. Tort. 2017. Annual and intradiurnal variation of dominant airborne pollen and the effects of meteorological factors in Çeşme (Izmir, Turkey). *Environmental monitoring and assessment* 189(10): 1-18.
- Valencia-Barrera, R. M., P. Comtois y D. Fernández-González. 2001. Biogeography and bioclimatology in pollen forecasting. *Grana* 40(4-5): 223-229.
- Valero Santiago A. L. y A. Cadahía García. 2002. *Polinosis: Polen y Alergia*. mra ediciones, S. L. España.
- Van Devender, T. R. y R. C. Brusca. 2015. Deep History of the Sonoran Desert, 63-71 p. En: Dimmit, M. A., Wentworth Comus, P y Brewer, L. M. (Eds.), *A natural history of the Sonoran Desert*. Arizona-Sonora Desert Museum Press. Arizona, United States of America.
- Velasco-Jiménez, M. J., P. Alcázar, E. Domínguez-Vilches y C. Galán. 2013. Comparative study of airborne pollen counts located in different areas of the city of Córdoba (south-western Spain). *Aerobiologia* 29(1): 113-120.
- Villaseñor-Gómez, J.F., O. Hinojosa-Huerta, E. Gómez-Limón, D. Krueper y A.D. Flesch. 2010. Avifauna, 385-420 p. En: Molina-Freaner, F. E. y Van Devender, T. R. (Eds.), *Diversidad biológica de Sonora*. Universidad Nacional Autónoma de México. Distrito Federal, México.
- Wallace, J. M. y P. V. Hobbs. 2006. *Atmospheric Science: An Introductory Survey*. Elsevier. California, United States of America.
- Warner, T.T. 2004. *Desert meteorology*. Cambridge University Press. New York, United States of America.
- World Health Organization (WHO). 2016. Impacto del medio ambiente en la salud, ¿cuál es el panorama general? [https://www.who.int/quantifying\\_ehimpacts/publications/PHE-prevention-diseases-infographic-ES.pdf?ua=1](https://www.who.int/quantifying_ehimpacts/publications/PHE-prevention-diseases-infographic-ES.pdf?ua=1). Acceso marzo 10, 2020.
- World Health Organization (WHO). 2018. Burden of disease from the joint effects of household and ambient air pollution for 2016, World Health Organization. [https://www.who.int/airpollution/data/AAP\\_BoD\\_results\\_May2018\\_final.pdf](https://www.who.int/airpollution/data/AAP_BoD_results_May2018_final.pdf). Acceso marzo 10, 2020.
- Zhang, Y., L. Bielory, Z. Mi, T. Cai, A. Robock y P. Georgopoulos. 2015. Allergenic pollen season variations in the past two decades under changing climate in the United States. *Global change biology* 21(4): 1581-1589.
- Ziska, L. H, P. R. Epstein y C. A. Rogers. 2008. Climate change, aerobiology, and public health in the Northeast United States. *Mitig Adapt Strat Glob Change* 13: 607–613.