

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS



“EFECTO DE LOS GRADIENTES ALTITUDINALES Y LAS
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS SOBRE LA CARGA FÚNGICA
DEL AIRE Y DE LAS FILOSFERAS DEL ÁREA METROPOLITANA
DE MONTERREY”

Por

HÉCTOR IVÁN DUÉÑEZ GARZA

Como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS con orientación en MICROBIOLOGÍA
APLICADA

Abril, 2024

“EFECTO DE LOS GRADIENTES ALTITUDINALES Y LAS CONDICIONES ATMOSFÉRICAS SOBRE LA CARGA FÚNGICA DEL AIRE Y DE LAS FILOSFERAS DEL ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY”

Tesis realizada por el alumno Héctor Iván Duñez Garza, matrícula 1677278, como opción al grado de Maestro en Ciencias con Orientación en Microbiología Aplicada.

Dirección de Tesis:

Dr. Ulrico Javier López Chuken
Director de Tesis

Dra. Evangelina Ramírez Lara
Codirectora

Dra. Julia Griselda Cerón Bretón
Codirectora externa

Profesores miembros del comité tutorial:

Dra. Pilar del Carmen Morales San Claudio

Dr. Jesús Alberto Gómez Treviño

Dr. Aldo Isaac Ramírez Castillo

RESUMEN

Héctor Iván Duéñez Garza.
Universidad Autónoma de Nuevo León.
Facultad de Ciencias Químicas.

Título del Estudio: **Efecto de los gradientes altitudinales y las condiciones atmosféricas sobre la carga fúngica del aire y de las filosferas del Área Metropolitana de Monterrey.**

Número de páginas: ##

Candidato para el grado de Maestría en
Ciencias con orientación en Microbiología Aplicada.

Área de Estudio: Microbiología aplicada en la rama ambiental.

Propósito: Identificar y caracterizar los principales hongos microscópicos presentes en muestras estacionales de aire y de diversas filosferas, correlacionándolos con parámetros meteorológicos, altitud y contaminantes criterio en diferentes estaciones del año en el periodo Marzo 2023 a Febrero 2024 de distintas zonas del Área Metropolitana de Monterrey (AMM).

Metodología: Se hicieron un total de 12 muestreos, éstos se realizaron en dos distintas zonas del AMM, un edificio con una altura máxima de 60 m y otro con una altura máxima de 146 m para la recolección de muestras de hongos aerotransportados, para realizar el muestreo se utilizó un equipo de succión de aire "Microbial air sampler" (Modelo FKC-1 del fabricante Fuxia Medical Technology Co. Ltd.) con el cual se obtuvieron muestras en un promedio de 5 minutos por placa, de manera simultánea se hicieron un muestreo en la altura máxima del edificio y en la superficie con una réplica, así mismo para el muestreo de filosferas se recolectaron en estos dos sitios una muestra por estación climática, las cuales por medio de una técnica de hisopado se cultivaron en agar PZDA; Una vez que ambas muestras se sembraron, se incubaron a una temperatura de 25°C con una humedad relativa del 55%, al obtener el crecimiento adecuado después de alrededor de 5 días de crecimiento, se hicieron los conteos de UFC y los aislamientos de los microorganismos para su caracterización, por ultimo para la caracterización de los hongos presentes en las muestras se hizo una identificación de las estructuras macroscópicas y microscópicas presentes en los hongos obtenidos.

Resultados: El mes con una mayor presencia de hongos aerotransportados promedio fue Octubre con 207 UFC, además de observó una disminución del 24.3% de UFC a 60 m de altura en comparación a la superficie y del 23.2% a 146 m de altura en comparación con la superficie, como variables importantes para la presencia de UFC se encontraron que la humedad relativa tiene un efecto positivo para el incremento de las mismas, mientras que la presencia de bióxido de azufre (SO₂) y partículas menores a 10 micras tienen un efecto negativo sobre estas; Se detectó la presencia de hongos patógenos oportunistas y fitopatógenos entre los 11 géneros caracterizado, en las muestras de filosferas se encontraron hongos con capacidades de degradación de contaminantes suspendidos en el aire.

Conclusiones: La concentración de UFC fúngicas es completamente dependiente de diferentes factores abióticos entre los cuales destacan la humedad relativa y algunos contaminantes criterio, se presenta también una disminución de la presencia de las mismas en alturas superiores a las de la superficie, lo que muestra la importancia del estudio de la aerobiología y todos los factores relacionados a ella.

Firma del director: _____ Firma de la codirectora: _____

Dr. Ulrico Javier López Chuken

Dra. Evangelina Ramírez Lara

AGRADECIMIENTOS

A CONAHCYT por la beca otorgada.

A la Facultad de Ciencias Químicas por abrirme las puertas y ayudarme a tener una visión más amplia de la biología y de los temas en relación con la contaminación ambiental.

A mis asesores por siempre ser de apoyo y por brindarme sus conocimientos en sus áreas respectivas, a mi compañera de laboratorio Karen por siempre estar ahí conmigo en todos los momentos de duda y de tensión que tuvimos, quien se ha convertido en una de mis personas más cercanas.

Al laboratorio de biotecnología y en especial a la Dra. Pilar Morales por su constante apoyo en todo lo relacionado con el proyecto y por ser una gran maestra, agradezco infinitamente.

A los miembros del comité tutorial por su constante apoyo.

A Melanie mi compañera de carrera y ahora de maestría con quien siempre pude contar y desvelarnos haciendo todos los pendientes, a mis amigos de maestría Beto y Nicolás por hacer la carga de la maestría mucho más ligera y siempre ayudar a que fluyera de una mejor manera.

A mis amigos de toda la vida Mario quien siempre me ha impulsado a ser una mejor persona y esforzarme en cada paso que sigo, Braian quien conmigo estuvo en cada momento estresante y divertido durante la maestría, a Tzu, una gran amiga que siempre me inspira a seguir con las cosas y dar lo mejor, quienes muchas veces me escucho en momentos de estrés y me dieron el pequeño empujón que necesitaba para poder seguir.

A Geanpaul que estuvo acompañándome siempre siendo de gran apoyo para mí y de darme alegrías que me ayudaron a seguir con este proyecto.

A mi familia quien siempre está para mí y que sin ella no podría hacer lo que hago.

DEDICATORIA

*Con mucho amor a cada una de las
personas que me ayudaron a formarme.*

Para mis padres y mis hermanos.

*A cada estrella que ha estado en mi vida
les agradezco con todo el corazón.*

Héctor Iván

ABREVIACIONES Y GLOSARIO

AMM	Área Metropolitana de Monterrey
PM ₁₀	Partículas con diámetro menor a 10 micrómetros
PM _{2.5}	Partículas con diámetro menor a 2.5 micrómetros
SIMA	Sistema Integral de Monitoreo Ambiental
Aire	Gas que conforma la atmosfera de la Tierra, sus componentes principales son el nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, neón, helio, entre otros.
Bioaerosol	Microorganismos suspendidos en el aire, que pueden ser bacterias, hongos, arqueas, virus y/o polen.
Filosfera	Microambiente que se encuentra en las superficies de las hojas de las plantas, en los cuales se incluye una variedad de microorganismos interactuando entre sí y con la planta.
Reino Fungi	Es un grupo de organismos eucarióticos que incluye mohos, levaduras y hongos.

ÍNDICE

Capítulo 1	3
INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN.....	3
1.1 Introducción	3
1.2 Justificación	4
Capítulo 2	5
ANTECEDENTES.....	5
2.1 Aire	5
2.2 Contaminantes del aire.....	5
2.2.1 Aerosoles químicos	5
2.2.2 Bioaerosoles.....	5
2.2.3 Variación de contaminantes biológicos.....	7
2.2.4 Efectos en la salud	8
2.3 Filosfera.....	8
2.3.1 Contaminantes aéreos y su relación con la filosfera	9
2.4 Área Metropolitana de Monterrey	9
2.4.1 Caracterización previa.....	11
Capítulo 3	13
HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	13
.....	13
3.1 Hipótesis.....	13
3.2 Objetivos.....	13
3.2.1 Objetivo general	13
3.2.2 Objetivos específicos.....	13
Capítulo 4	14
MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
4.1 Área de trabajo	14
4.2 Disposición de residuos.....	15
4.3 Metodología general	16
4.4 Muestreos.....	16
4.4.1 Aislamiento de hongos	23
4.4.2 Aislamiento de filosferas	24

Capítulo 5	26
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
5.1 Muestreos	26
5.1.1 Muestreos de hongos aerotransportados	26
5.1.2 Muestreo de filosferas	32
5.2 Datos de contaminantes criterio	34
5.3 Caracterización morfológica	34
5.3.1 Orden Endomicetales	38
5.3.2 Diversidad biológica	38
5.4 Análisis estadísticos	40
5.4.1 Pruebas de relación sobre la altura y las UFC	42
5.4.2 Correlación de variables	44
5.5 Géneros de relevancia	45
5.5.1 Patógenos oportunistas	45
5.5.2 Fitopatógenos	46
Capítulo 6	46
CONCLUSIONES	46
ANEXOS	48
REFERENCIAS	52
.....	52

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Normativa aplicable a contaminantes criterio	10
Tabla 2 Diversidad aérea microbiológica en el AMM	11
Tabla 3 Calendario de muestreos	16
Tabla 4 Formulación del medio de cultivo PZDA	23
Tabla 5 Metodologías para el aislamiento de microorganismos de filosferas	25
Tabla 6 Datos de contaminantes criterio	34
Tabla 7 Macro y micrografías de los géneros encontrados	34
Tabla 8 Géneros de hongos encontrados por sitio de muestreo y altura, meses de Marzo a Agosto 2023	39
Tabla 9 Géneros de hongos encontrados por sitio de muestreo y altura, meses de Septiembre 2023 a Febrero 2024	39
Tabla 10 Géneros previamente encontrados en el AMM	40

Tabla 11 Desglose de datos por mes de los muestreos de hongos aerotransportados, Marzo a Julio 2023.....	41
Tabla 12 Desglose de datos por mes de los muestreos de hongos aerotransportados, Agosto a Diciembre 2023.....	41
Tabla 13 Desglose de datos por mes de los muestreos de hongos aerotransportados, Enero y Febrero 2024	42

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Calidad del aire en el AMM, SIMA.....	10
Gráfica 2 UFCs durante el año de muestreo Marzo 2023 a Febrero 2024	38
Gráfica 3 Box plots de diferencias de UFC en diferentes alturas, Torre Rectoría	42
Gráfica 4 Box plots de diferencias de UFC en diferentes alturas, Torre Helicon.....	43
Gráfica 5 Matriz de correlación de variables de factores abióticos y UFC de hongos aerotransportados.....	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Sitios de muestreo seleccionados	15
Figura 2 Diagrama de la metodología general a seguir	16
Figura 3 Mapa de ubicaciones de las estaciones del SIMA y sitios de muestreo.....	17
Figura 4 Muestreos pertenecientes a la estación climática primavera, arriba pertenecientes a la Torre Rectoría UANL y abajo a la Torre Helicon.....	18
Figura 5 Muestreos pertenecientes a la estación climática verano, arriba pertenecientes a la Torre Rectoría UANL y abajo a la Torre Helicon.....	19
Figura 6 Muestreos pertenecientes a la estación climática otoño, arriba pertenecientes a la Torre Rectoría UANL y abajo a la Torre Helicon.....	20
Figura 7 Muestreos pertenecientes a la estación climática invierno, arriba pertenecientes a la Torre Rectoría UANL y abajo a la Torre Helicon.....	21
Figura 8 Muestreo de las filosferas con algunas de las familias de las que se obtuvieron las hojas pertenecientes a) estación climática de primavera y b) estación climática de verano.....	22

Figura 9 Muestreo de las filosferas con algunas de las familias de las que se obtuvieron las hojas pertenecientes c) estación climática de otoño y d) estación climática de invierno	23
Figura 10 Muestras de hongos obtenidas en el mes de Marzo del 2023, a y b correspondientes a la altura máxima de cada sitio y c y d la altura de nivel superficie	26
Figura 11 Muestras de hongos obtenidas en el mes de Abril del 2023, a y b correspondientes a la altura máxima de cada sitio y c y d la altura de nivel superficie	27
Figura 12 Muestras de hongos obtenidas en el mes de Mayo del 2023, a y b correspondientes a la altura máxima de cada sitio y c y d la altura de nivel superficie	27
Figura 13 Muestras de hongos obtenidas en el mes de Junio del 2023, a y b correspondientes a la altura máxima de cada sitio y c y d la altura de nivel superficie	28
Figura 14 Muestras de hongos obtenidas en el mes de Junio del 2023, a y b correspondientes a la altura máxima de cada sitio y c y d la altura de nivel superficie	28
Figura 15 Muestras de hongos obtenidas en el mes de Agosto del 2023, a y b correspondientes a la altura máxima de cada sitio y c y d la altura de nivel superficie	29
Figura 16 Muestras de hongos obtenidas en el mes de Septiembre del 2023, a y b correspondientes a la altura máxima de cada sitio y c y d la altura de nivel superficie	29
Figura 17 Muestras de hongos obtenidas en el mes de Octubre del 2023, a y b correspondientes a la altura máxima de cada sitio y c y d la altura de nivel superficie	30
Figura 18 Muestras de hongos obtenidas en el mes de Noviembre del 2023, a y b correspondientes a la altura máxima de cada sitio y c y d la altura de nivel superficie	30
Figura 19 Muestras de hongos obtenidas en el mes de Diciembre del 2023, a y b correspondientes a la altura máxima de cada sitio y c y d la altura de nivel superficie	31
Figura 20 Muestras de hongos obtenidas en el mes de Enero del 2024, a y b correspondientes a la altura máxima de cada sitio y c y d la altura de nivel superficie	31
Figura 21 Muestras de hongos obtenidas en el mes de Febrero del 2024, a y b correspondientes a la altura máxima de cada sitio y c y d la altura de nivel superficie	32
Figura 22 Muestras de filosferas obtenidas	33
Figura 23 Cultivos de filosferas por hisopado en agar PZDA	33
Figura 24 Levaduras encontradas durante los muestreos de hongos aerotransportados.....	38

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

1.1 Introducción

La contaminación del aire es causada principalmente por una amplia variedad de componentes químicos en la atmósfera. Sin embargo, en la actualidad el interés en el estudio de los contaminantes de origen biológico ha comenzado a incrementar, debido a que incluyen una amplia gama de microorganismos como hongos, bacterias, arqueas y virus, quienes en conjunto constituyen alrededor del 25% de la masa total de los aerosoles suspendidos (Ruiz-Gil, y otros, 2020). La diversidad de microorganismos presentes en estos bioaerosoles es dependiente de la contaminación en el aire del lugar, el tamaño de las micropartículas, así como de la humedad, la velocidad del viento y otros factores abióticos del mismo (Bowers, y otros, 2013).

La contaminación del aire está ligada al desarrollo de muchas enfermedades, aunque la mayoría de los estudios se centren en los aerosoles químicos principalmente, es importante tener una visión de los daños que causan los bioaerosoles por lo que es importante el identificarlos primero y conocer su variación durante los cambios estacionales.

El Área Metropolitana de Monterrey (AMM) es la ciudad con más altos índices de contaminación del aire en México y durante los últimos cinco años, ha ido aumentando exponencialmente; esto de acuerdo con los datos registrados por el Sistema de Monitoreo Ambiental (SIMA) (Mayora, 2019). Además el SIMA realiza el monitoreo de los aerosoles de origen químico, por lo que el estudio de bioaerosoles es de suma importancia para lograr entender con mayor profundidad el problema que se presenta en el AMM.

Estudios previos realizados en la UANL han demostrado que la biodiversidad y carga microbiana en el aire del AMM son afectadas por factores, tales como la meteorología, densidad poblacional y ubicación espacial (Gamboa Quezada, 2020). Por otra parte, se ha demostrado que las comunidades de microorganismos varían incluso dentro de un área pequeña, pues son capaces de generar comunidades locales dependiendo de variaciones altitudinales (Tanaka, y otros, 2019).

De igual manera, la filosfera, microambiente presente en las hojas de las plantas, contiene una comunidad de microorganismos que interactúan entre ellos y con su entorno natural y representa un área de oportunidad para la investigación, por lo que una caracterización de los mismos dará pie para realizar estudios posteriores sobre biorremediación de los contaminantes del aire, todo esto con el fin de contribuir al estudio de factores que puedan reducir

el impacto que tiene la problemática de contaminantes químicos y microbiológicos en el aire que sigue acrecentándose en el AMM.

Siendo así, el presente trabajo está orientado a la cuantificación y caracterización de los hongos aerotransportados en distintos puntos del AMM debido a los problemas de salud a los que están asociados. Además de tomar en cuenta factores como la densidad poblacional y la ubicación espacial, se estudiará el efecto de la altitud y temporalidad de las especies presentes en el aire, así como una caracterización de las especies presentes en las filosferas cercanas a las zonas de los muestreos.

1.2 Justificación

La ciudad de Monterrey, Nuevo León ha sido considerada como la primera ciudad más contaminada por PM_{10} y $PM_{2.5}$ en México, de acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS) en el periodo correspondiente a los años 2008-2013, los altos niveles de contaminantes aéreos registrados fueron asociados con el aumento de enfermedades respiratorias, esto generó un creciente interés en el desarrollo de estudios a la rama medio ambiental y contaminantes del ecosistema aéreo (Copenhagen Consensus Center, 2015) (Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO), 2016).

La diversidad de contaminantes que se encuentran suspendidos tanto de bioaerosoles como de contaminantes químicos, nos dan pie a entender el comportamiento de estos y como es que cambia dependiendo de las estaciones climáticas en las cuales se encuentran, y sus variaciones dependiendo de distintos factores abióticos.

Los sitios para el muestreo (Sitio Torre Rectoría y Torre Helicon) se seleccionaron debido a su localización dentro del AMM y el acceso a las estaciones de muestreo del SIMA.

El presente estudio dará continuidad a estudios previos (Gamboa Quezada, 2020) y generará información nueva sobre la diversidad de hongos microscópicos presentes en la atmósfera baja del Área Metropolitana de Monterrey, su variación y afectación de acuerdo a las temporadas climáticas, la altitud a la cual se encuentran, además de generar información sobre la biodiversidad de microorganismos presentes en la filosfera de flora nativa cercana a los sitios de muestreo con el fin de consolidar una base de datos sobre los mismos para estudios posteriores dentro del AMM.

Todo esto con el fin de tener un mayor entendimiento sobre los distintos cambios en las concentraciones de contaminantes presentes en el aire y en busca de alternativas sustentables para la filorremediación de algunos de los contaminantes presentes en el aire.

Capítulo 2

ANTECEDENTES

2.1 Aire

El aire es la mezcla de diferentes gases que se encuentran dentro de la atmósfera gracias a la fuerza de la gravedad y está compuesto en su mayoría por Nitrógeno (78.08%), Oxígeno (20.95%) y Argón (0.93%) y algunos gases en cantidades pequeñas, así como partículas suspendidas. La composición de la atmósfera va cambiando de acuerdo con la altitud y las diferentes capas que la conforman, mismas que se generan debido a los gradientes de temperatura. La troposfera es la capa más baja de la atmósfera, y su rango va de 0 a 10 km, y es en esta misma donde se desarrollan la mayoría de los organismos vivos por lo que es en la cual se enfocará este estudio (Schlesinger, 2020).

2.2 Contaminantes del aire

2.2.1 Aerosoles químicos

Son suspensiones coloidales de partículas líquidas o sólidas en un gas y tienen su origen en ambientes naturales o artificiales, siendo los ambientes artificiales los que tienen una mayor contribución. Existen ciertos contaminantes denominados criterio, debido a que son los que tienen un mayor impacto perjudicial, cuyas concentraciones en el aire ambiente se encuentran regulados por Normas Oficiales Mexicanas (NOMs) con el fin de proteger la salud de la población. Dentro de estos se encuentran las micropartículas con diámetros aerodinámicos menores o iguales a $10\mu\text{m}$ (PM_{10}) y con diámetros aerodinámicos menores o iguales a $2.5\mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$), el ozono (O_3), el dióxido de azufre (SO_2), el dióxido de nitrógeno (NO_2) y el monóxido de carbono (CO). La exposición continua a estos contaminantes trae consigo repercusiones a la salud, por lo que constituyen un factor de riesgo poblacional (SIMA, 2024).

2.2.2 Bioaerosoles

Ya que el aire carece de nutrientes para sostener formas de vida en él, los microorganismos presentes solo se encuentran de manera momentánea, pues la microbiota del aire es dinámica y cambiante, dependiente de muchos factores abióticos del medio ambiente en el que se encuentren como la temperatura, la altitud a nivel del mar, el relieve, las corrientes de viento, etc.

Estos microorganismos en el aire, tienen distintos orígenes, en las ciudades o zonas urbanizadas provienen principalmente de tres fuentes de origen: fecalismo a ras de suelo, en donde estos microorganismos son dispersados

de las heces fecales que se han desecado en el ambiente abierto y pasan a ser suspendidos gracias a las corrientes de aire, de los suelos donde algunos microorganismos son levantados y suspendidos temporalmente y por último de las superficies de las hojas, o filosferas, que son microorganismos que se desprenden de este microambiente para pasar al aire (Bowers, y otros, 2011).

Los microorganismos del aire pertenecen a distintos reinos taxonómicos como fungi, bacterias, arquea y algunos virus. Los hongos y bacterias son los que se encuentran en mayor abundancia en el aire ambiente y tienen una mayor presencia, por lo que toman una mayor importancia en el estudio de la microbiota aerotransportada.

2.2.2.1 Hongos

Los hongos forman una gran parte de los microorganismos presentes en el aire como bioaerosoles, sus formas van desde esporas fúngicas hasta levaduras y hongos filamentosos, estos son capaces de influenciar la nucleación del hielo y la formación de cristales, entre otros fenómenos meteorológicos. Tienen además una gran importancia en el área de la salud, ya que algunos de los hongos que se encuentran en el aire son capaces de desencadenar reacciones alérgicas y algunos incluso son patogénicos como las esporas de los géneros *Alternaria*, *Aspergillus* y *Cladosporium* (Fröhlich-Nowoisky, Pickersgill, Després, & Pöschl, 2009).

Debido a su potencial patogénico los hongos en el aire son ampliamente estudiados y existen múltiples caracterizaciones moleculares de la presencia de estos en ambientes cerrados y abiertos en distintas partes del mundo. Son muchos los factores que afectan la presencia de estos y sus poblaciones son altamente dinámicas, no todos los hongos se encuentran en formas activas en el aire, pues algunos se pueden encontrar en sus formas vegetativas sin perder viabilidad, esperando entrar en contacto con un hospedero o con un ambiente con alta humedad y temperatura más templada en el cual sean capaces de crecer, usualmente siendo esta su forma de spora (De La Rosa, Mosso, & Ullán, 2002).

2.2.2.2 Bacterias

Desde el año 1800 se conoce la presencia de las bacterias en el aire y como su diversidad varía durante las estaciones del año, dependiendo de la altitud, las temperaturas y muchas otras características medioambientales. Las formas bacterianas más frecuentemente encontradas en el aire son bacilos esporulados y cocos, la mayoría de estas bacterias tienen la capacidad de infectar y causar enfermedades a las personas que entran en contacto con ellas, desde que se conoce de esto se usan como un índice de contaminación del aire, pues su presencia indica un riesgo al estar en ese medio ambiente (De La Rosa, Mosso, & Ullán, 2002).

2.2.2.3 Arqueas

Los organismos pertenecientes al dominio Arquea juegan papeles importantes en los ciclos biológicos, a pesar de ello, su relevancia en la microbiota aerotransportada no ha sido estudiada muy a detalle. Se sabe que estos microorganismos son altamente dependientes de las condiciones climáticas y sus poblaciones son altamente dinámicas, cambiando en cada localidad (Niu, y otros, 2020), además que el aire juega un papel importante en la dispersión de los organismos de este dominio (Fröhlich-Nowoisky, y otros, 2014).

2.2.2.4 Virus

La estabilidad de los virus en suspensiones aéreas es muy baja para ser considerados como microorganismos pertenecientes a la microbiota aérea, pues la mayoría de los que se encuentran suspendidos vienen de la respiración, vocalización y/o estornudos de personas que se encuentren dentro del entorno, su tiempo medio de infectividad mientras se encuentran en el aire es dependiente de factores como temperatura, radiación UV y la humedad del aire, sin embargo su tiempo medio en suspensión baja enormemente en ambientes abiertos (Wang, y otros, 2021)

2.2.2.5 Polen

El polen es uno de los bioaerosoles presentes en el aire no categorizado como microorganismo, no obstante tiene una gran importancia en la aerobiología, pues es un conocido componente alergénico. Este es liberado en grandes cantidades durante épocas de floración de las plantas silvestres, además junto con las esporas fúngicas es uno de los principales causantes de contaminación del aire en espacios cerrados como lo son los edificios. En los últimos años, el estudio de la presencia de polen en el aire ha cobrado una mayor importancia por su gran actividad alergénica al entrar en contacto con mucosas humanas y su capacidad de iniciar procesos anafilácticos (Nitiu & Mallo, 2011).

2.2.3 Variación de contaminantes biológicos

La comunidad de microorganismos suspendidos en el aire es completamente variable, factores como la temperatura, la humedad, la velocidad del aire, la presencia de contaminantes suspendidos, y la actividad humana tienen un gran impacto en esta microbiota (Jain , Jain, & Jain , 2020).

Además, se ha encontrado que la altitud juega un papel importante en los microorganismos eucariotas como lo son los hongos, en un estudio en Toyama Japón se encontró que a diferentes altitudes dentro del mismo sitio la carga fúngica en el aire se distingue por la presencia de distintas especies (Tanaka, y otros, 2019). Así mismo, se ha visto que en alturas mayores a los 7 km los microorganismos presentan una disminución gradual en su tamaño celular, esto por la presencia cada vez menor de sus fuentes de origen, como plantas, animales, etc. (DeLeon-Rodriguez, y otros, 2013).

Las variaciones en los microorganismos y como estos van cambiando su densidad poblacional es debido a todos los factores que ya antes se mencionaron, por lo que cada uno de estos factores está completamente relacionado con la presencia de estos, es importante tener un conocimiento del medio en el que se desarrollan para tener un mayor entendimiento de por qué es que estos microorganismos sobreviven a estas alturas (Drautz-Moses, y otros, 2022).

2.2.4 Efectos en la salud

En las últimas décadas se han registrado datos sobre la asociación de contaminantes atmosféricos con el incremento de las consultas de urgencias por enfermedades. Entre más pequeño es el tamaño de las partículas éstas pueden ser más dañinas, se sabe que están asociados con el incremento en la morbimortalidad de la población, debido a que tienen la facilidad de penetrar el interior de pulmones y causar efectos tóxicos por sus características fisicoquímicas. Entre los efectos que causan están un incremento en problemas pulmonares, tales como tos, dificultad y dolor para respirar, bronquitis crónica, reducción de la función pulmonar y asma, entre otras consecuencias (Román Pedroza, 2013). El tamaño de estas partículas hace que sean más ligeras y por eso, generalmente, permanecen por más tiempo en el aire.

Se ha asociado un mayor grado de mortalidad en ciudades con un índice de contaminación del aire alto como es la CDMX en México, en comparación con ciudades que no lo presentan y se encontró una relación directa entre la contaminación atmosférica y el cáncer pulmonar y otras enfermedades respiratorias (Rojas Bracho & Garibay Bravo, 2003).

Además del material particulado, los microorganismos pueden causar irritaciones por efectos tóxicos y alergias, en cada uno de los distintos ambientes el riesgo es variable gracias a la diversidad que existe en las distintas zonas. No todos los microorganismos presentes en la microbiota del aire son causantes de efectos negativos a la salud, pero existen microorganismos que si son capaces de generar problemas de salud como es el caso del hongo *Aspergillus fumigatus* que es capaz de generar infecciones sistémicas y locales. Por lo que un mayor conocimiento de los agentes infecciosos presentes en el aire juega un rol importante para la salud pública (Brenner, Heinze, Szewzyk, Wolter, & Werr, 2017).

2.3 Filosfera

La filosfera es un microambiente presente en las hojas de las plantas, en la cual se encuentra una gran diversidad de microorganismos que ayudan a la planta en diversos procesos como la fijación de CO₂ y la captación de nutrientes útiles a las plantas (Pandiyán, y otros, 2021).

Estos microorganismos sostienen una relación mutualista con las plantas en las cuales se hospedan, no obstante como se mencionó previamente estos microorganismos pasan de la filosfera a la microbiota aérea temporalmente, por lo que el estudio de las comunidades que se encuentran en estos microbiomas ha comenzado a tomar fuerza en los últimos años.

2.3.1 Contaminantes aéreos y su relación con la filosfera

En estudios previos en Costa Rica (Brighigna, Gori, Gonnelli, & Favilli, 2000), se ha observado que los microorganismos presentes en la filosfera son dependientes de los factores externos de contaminación, por ejemplo, especies de hongos y bacterias fijadoras de nitrógeno que se encuentran en filosferas de *Tillandsia spp.* en ambientes con altos índices de contaminantes criterio tienden a ser más resistentes a estos contaminantes. Por lo que es posible que en ambientes con índices de contaminación alta se encuentren microorganismos con capacidades de biodegradar los contaminantes en compuestos menos nocivos a la salud.

2.3.1.1 Filorremediación

Los microorganismos presentes en la filosfera tienen potencial de degradar distintos compuestos que se encuentran como contaminantes en el aire, China e India son países que han comenzado a desarrollar técnicas de filorremediación con el fin de disminuir las concentraciones de especies contaminantes, se han propuesto distintas aplicaciones de estas tecnologías y para ello es importante primero tener un conocimiento sobre la microbiota presente en las filosferas de plantas nativas del lugar al cual se busca filorremediar (Wei, y otros, 2017).

El conocimiento sobre los microorganismos presentes en las filosferas de los sitios seleccionados podría representar el primer paso para proponer acciones a realizar con el fin de disminuir los valores de contaminantes criterio como partículas suspendidas totales, PM10, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, entre otros contaminantes presentes en el aire del AMM.

2.4 Área Metropolitana de Monterrey

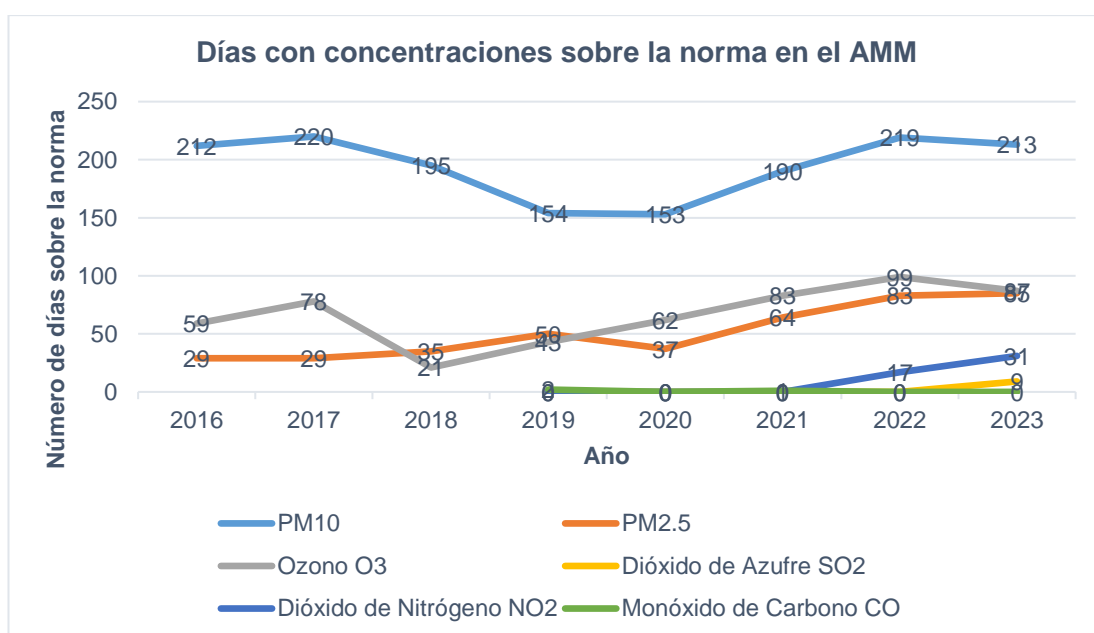
Hoy en día el AMM cuenta con un elevado índice de contaminación del aire por aerosoles químicos, el cual es provocado principalmente por cuatro factores: la industria, los automóviles, actividades comerciales y servicios así como factores ambientales como la erosión del suelo.

Existe una gama diversa de contaminantes de aire en la AMM, sin embargo entre los que destacan de estos son el monóxido de carbono (CO) el cual es regularmente producido debido al proceso de la quema de combustible de los vehículos, así como el ozono (O₃) el cual es formado por la reacción química de compuestos orgánicos volátiles (COV) y óxidos de nitrógeno (NO_x). Por otra, parte también está presente el dióxido de nitrógeno (NO₂) el cual se encuentra generado principalmente por la quema de combustibles de fuentes

móviles de empresas del sector energético, grandes calderas industriales así mismo por la quema de madera, teniendo como principal contaminante las micro partículas (Martínez Muñoz & Valdez Cavazos, 2016).

Las micropartículas con diámetros aerodinámicos menores o iguales a $10\mu\text{m}$ (PM_{10}), y con diámetros aerodinámicos menores o iguales a $2.5\mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$), también forman parte de uno de los contaminantes con mayores concentraciones en el AMM (Copenhagen Consensus Center, 2015).

El Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA) ofrece reportes anuales de la calidad del aire. En la gráfica 1 se pueden observar el número de días por año en los que los contaminantes se encontraron por arriba de los límites permisibles establecidos por las diferentes NOMs correspondientes a cada uno de los contaminantes, las cuales se pueden observar en la tabla 1.



Gráfica 1 Calidad del aire en el AMM, SIMA

Tabla 1 Normativa aplicable a contaminantes criterio

Contaminante	Norma	Tiempo de Exposición (horas)
Monóxido de Carbono (CO)	NOM-021-SSAI-2021	1
Monóxido de Carbono (CO)	NOM-021-SSAI-2021	8
Bióxido de Azufre (SO ₂)	NOM-022-SSAI-2019	1
Bióxido de Azufre (SO ₂)	NOM-022-SSAI-2019	24
Ozono (O ₃)	NOM-020-SSAI-2021	1
Ozono (O ₃)	NOM-020-SSAI-2021	8
Bióxido de Nitrógeno (NO ₂)	NOM-023-SSAI-2021	1
Bióxido de Nitrógeno (NO ₂)	NOM-023-SSAI-2021	Promedio Anual
Partículas Menores a 10 Micras (PM ₁₀)	NOM-025-SSAI-2021	24
Partículas Menores a 10 Micras (PM ₁₀)	NOM-025-SSAI-2021	Promedio Anual
Partículas Menores a 2.5 Micras (PM _{2.5})	NOM-025-SSAI-2021	24

Partículas Menores a 2.5 Micras (PM _{2.5})	NOM-025-SSAI-2021	Promedio Anual
--	-------------------	----------------

* Días que las concentraciones del contaminante se encontraron por sobre la norma correspondiente.

** Todos los datos recabados se obtuvieron del SIMA. (SIMA, 2024)

Los contaminantes biológicos han sido caracterizados previamente y se ha encontrado que la mayor afluencia de estos es en las estaciones de invierno y en las áreas con mayor concurrencia de personas, no se tienen por el momento normativas que nos indiquen límites permisibles de microorganismos suspendidos por lo que solo se tiene una caracterización de las especies y se establecieron como áreas de riesgo a los municipios de Guadalupe y Santa Catarina dentro del AMM (Gamboa Quezada, 2020).

Otro punto importante a destacar sobre el AMM es su orografía ya que se encuentra situado entre cerros los cuales hacen más complejo el flujo del aire a través de la región, haciendo así que la movilización de los contaminantes sea más lenta y tienden a permanecer suspendidos en el aire por más tiempo (Leál-Iga, 2019).

2.4.1 Caracterización previa

Se han realizado estudios previos sobre la diversidad microbiológica en el aire del AMM como se puede observar en la Tabla 2, los criterios que se siguieron han sido de zonas cercanas a sitios urbanos y a diferentes estaciones del año, a pesar de ello no se han realizado estudios a diferentes alturas en donde se pueda observar la fluidez de la carga fúngica en el aire, así como tampoco sobre la correlación que la filofera cercana a los sitios tiene en cuanto a la diversidad microbiológica del aire.

Tabla 2 Diversidad aérea microbiológica en el AMM

Tipo de bioaerosol	Genero	Especie	Lugar de muestreo	Referencia
Hongos	<i>Monosporium</i>	<i>sp</i>	San Nicolás de los Garza, N.L.	(Verástegui Rubio, y otros, 2015)
	<i>Bipolaris</i>	<i>sp</i>	San Nicolás de los Garza, N.L.	(Verástegui Rubio, y otros, 2015)
	<i>Trychophyton</i>	<i>sp</i>	San Nicolás de los Garza, N.L.	(Verástegui Rubio, y otros, 2015)
	<i>Curvularia</i>	<i>sp</i>	San Nicolás de los Garza, N.L.	(Verástegui Rubio, y otros, 2015)
	<i>Aspergillus</i>	<i>sp</i>	San Nicolás de los Garza, N.L.	(Verástegui Rubio, y otros, 2015)
	<i>Rhizopus</i>	<i>sp</i>	San Nicolás de los Garza, N.L.	(Verástegui Rubio, y otros, 2015)
	<i>Cladosporium</i>	<i>sp</i>	San Nicolás de los Garza, N.L.	(Verástegui Rubio, y otros, 2015)

	<i>Monilia</i>	<i>sp</i>	San Nicolás de los Garza, N.L.	(Verástegui Rubio, y otros, 2015)
	<i>Fusarium</i>	<i>sp</i>	San Nicolás de los Garza, N.L.	(Verástegui Rubio, y otros, 2015)
	<i>Cephalosporium</i>	<i>sp</i>	San Nicolás de los Garza, N.L.	(Verástegui Rubio, y otros, 2015)
	<i>Alternaria</i>	<i>sp</i>	Monterrey, N.L.	(Nava Palacios, García S., & Sánchez-Yañez, 2006) (Fernandez-Gracia, y otros, 2023)
	<i>Penicillium</i>	<i>sp</i>	Monterrey, N.L.	(Nava Palacios, García S., & Sánchez-Yañez, 2006)
	<i>Metarhizium</i>	<i>sp</i>	Monterrey, N.L.	(Nava Palacios, García S., & Sánchez-Yañez, 2006)
	<i>Bipolaris</i>	<i>sp</i>	Monterrey, N.L.	(Nava Palacios, García S., & Sánchez-Yañez, 2006)
	<i>Acremonium</i>	<i>sp</i>	Monterrey N.L.	(Fernandez-Gracia, y otros, 2023)
	<i>Arthrotrrys</i>	<i>sp</i>	Monterrey, N.L.	(Fernandez-Gracia, y otros, 2023)
	<i>Verticillium</i>	<i>sp</i>	Monterrey, N.L.	(Fernandez-Gracia, y otros, 2023)
	<i>Stachybotrys</i>	<i>sp</i>	Monterrey, N.L.	(Fernandez-Gracia, y otros, 2023)
	<i>Pseudallescheria</i>	<i>sp</i>	Monterrey, N.L.	(Fernandez-Gracia, y otros, 2023)
	<i>Paecilomyces</i>	<i>sp</i>	Monterrey, N.L.	(Fernandez-Gracia, y otros, 2023)
	<i>Nigrospora</i>	<i>sp</i>	Monterrey, N.L.	(Fernandez-Gracia, y otros, 2023)
	<i>Neurospora</i>	<i>sp</i>	Monterrey, N.L.	(Fernandez-Gracia, y otros, 2023)
	<i>Humicola</i>	<i>sp</i>	Monterrey, N.L.	(Fernandez-Gracia, y otros, 2023)
	<i>Basipetospora</i>	<i>sp</i>	Monterrey, N.L.	(Fernandez-Gracia, y otros, 2023)
	<i>Botrytis</i>	<i>sp</i>	Monterrey, N.L.	(Fernandez-Gracia, y otros, 2023)
	<i>Chrysosporium</i>	<i>sp</i>	Monterrey, N.L.	(Fernandez-Gracia, y otros, 2023)
	<i>Geotrychum</i>	<i>sp</i>	Monterrey, N.L.	(Fernandez-Gracia, y otros, 2023)
Bacterias	<i>Bacillus</i>	<i>sp</i>	San Nicolás de los Garza, N.L.	(Verástegui Rubio, y otros, 2015)
		<i>thuringiensis</i>	Santa Catarina y Guadalupe, N.L.	(Gamboa Quezada, 2020)
		<i>cereus</i>	Santa Catarina, N.L.	(Gamboa Quezada, 2020)
	<i>Enterobacter</i>	<i>agglomerans</i>	San Nicolás de los Garza, N.L.	(Verástegui Rubio, y otros, 2015)
		<i>aerogenes</i>	San Nicolás de los Garza, N.L.	(Verástegui Rubio, y otros, 2015)

		<i>cloacae</i>	Monterrey, N.L.	(Nava Palacios, García S., & Sánchez-Yañez, 2006)
	<i>Salmonella</i>	<i>sp</i>	San Nicolás de los Garza, N.L.	(Verástegui Rubio, y otros, 2015)
	<i>Klebsiella</i>	<i>sp</i>	San Nicolás de los Garza, N.L.	(Verástegui Rubio, y otros, 2015)
	<i>Pseudomonas</i>	<i>aeuroginosa</i>	San Nicolás de los Garza, N.L.	(Verástegui Rubio, y otros, 2015)
	<i>Enterococcus</i>	<i>faecium</i>	Santa Catarina, N.L.	(Gamboa Quezada, 2020)
	<i>Staphylococcus</i>	<i>spp</i>	Apodaca, N.L.	(Gamboa Quezada, 2020)
	<i>Proteus</i>	<i>spp</i>	Monterrey, N.L.	(Nava Palacios, García S., & Sánchez-Yañez, 2006)
	<i>Pantoea</i>	<i>agglomerans</i>	Monterrey, N.L.	(Nava Palacios, García S., & Sánchez-Yañez, 2006)

Capítulo 3

HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

3.1 Hipótesis

En las muestras de aire y de filosferas del AMM la diversidad de especies de hongos y su cantidad de UFC/m³ variará en cada punto de muestreo, dependiendo de factores como las estaciones del año, altura sobre la superficie, la concentración de contaminantes criterio presentes en el área, entre otros factores abióticos.

3.2 Objetivos

3.2.1 Objetivo general

Identificar y caracterizar los principales hongos microscópicos presentes en muestras de aire y de diversas filosferas, correlacionándolos con parámetros meteorológicos, altitud y contaminantes criterio en diferentes temporadas climáticas de distintas zonas del Área Metropolitana de Monterrey.

3.2.2 Objetivos específicos

- I. Obtener y caracterizar las muestras de aire de tropósfera baja y de filosferas durante el periodo 2023-2024.
- II. Identificar la presencia de hongos cultivables en las muestras de aire mediante técnicas convencionales.
- III. Correlacionar la presencia y concentración de hongos en la atmósfera baja con parámetros meteorológicos y contaminantes criterio durante

el período de estudio en la tropósfera baja para determinar la prevalencia de estos en cada estación del año y tomando en cuenta la altura sobre la superficie terrestre.

- IV. Relacionar la biodiversidad de hongos colectados con los riesgos a la salud que podrían causar.
- V. Realizar un diagnóstico de calidad microbiológica del aire de acuerdo con los datos obtenidos de la caracterización para poder relacionarlos con las especies de relevancia médica a fin de determinar zonas o áreas críticas.
- VI. Sugerir posibles acciones preventivas o correctivas a fin de disminuir la carga fúngica en las zonas afectadas, utilizando los datos obtenidos de la caracterización de las filosferas.

Capítulo 4

MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Área de trabajo

La presente investigación se llevó a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Biotecnología en el Centro de Laboratorios Especializados (CELAES) de la Facultad de Ciencias Químicas de la UANL.

Los muestreos se realizaron en la azotea de la Torre de Rectoría de la UANL, ubicada en Ave. Universidad S/N, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L., (coordenadas: 25.72663372672453, -100.31191460285889) que tiene una altura máxima de 60 m de altura en el punto de muestro superior, y en la Torre Helicon ubicada en José Clemente Orozco 329, Zona Valle Oriente, 66278 Monterrey, N.L. (coordenadas: 25.644665597434635, -100.32444571718388) con una altura máxima de 156 m de altura y donde la altura del punto del muestreo superior fue de 146 m (figura 1).



Figura 1 Sitios de muestreo seleccionados

4.2 Disposición de residuos

Los residuos generados durante la realización del proyecto de investigación fueron clasificados y su disposición fue realizada de acuerdo a sus características químicas o biológicas y observando la normativa ambiental vigente y los procedimientos establecidos por la Facultad de Ciencias Químicas (FCQ) de la UANL con base en el procedimiento PR-SPO-MAS/000 y PR-SPO-MAS/003 a través del correcto uso de los contenedores proporcionados por el Departamento de Medio Ambiente y Seguridad, mismo que se asegurará de llevar a cabo las labores pertinentes de almacenaje temporal para su posterior disposición final ante gestores ambientales autorizados por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

4.3 Metodología general

La metodología a seguir se especifica a continuación de manera breve (Figura 2) y se desglosa en los siguientes incisos.

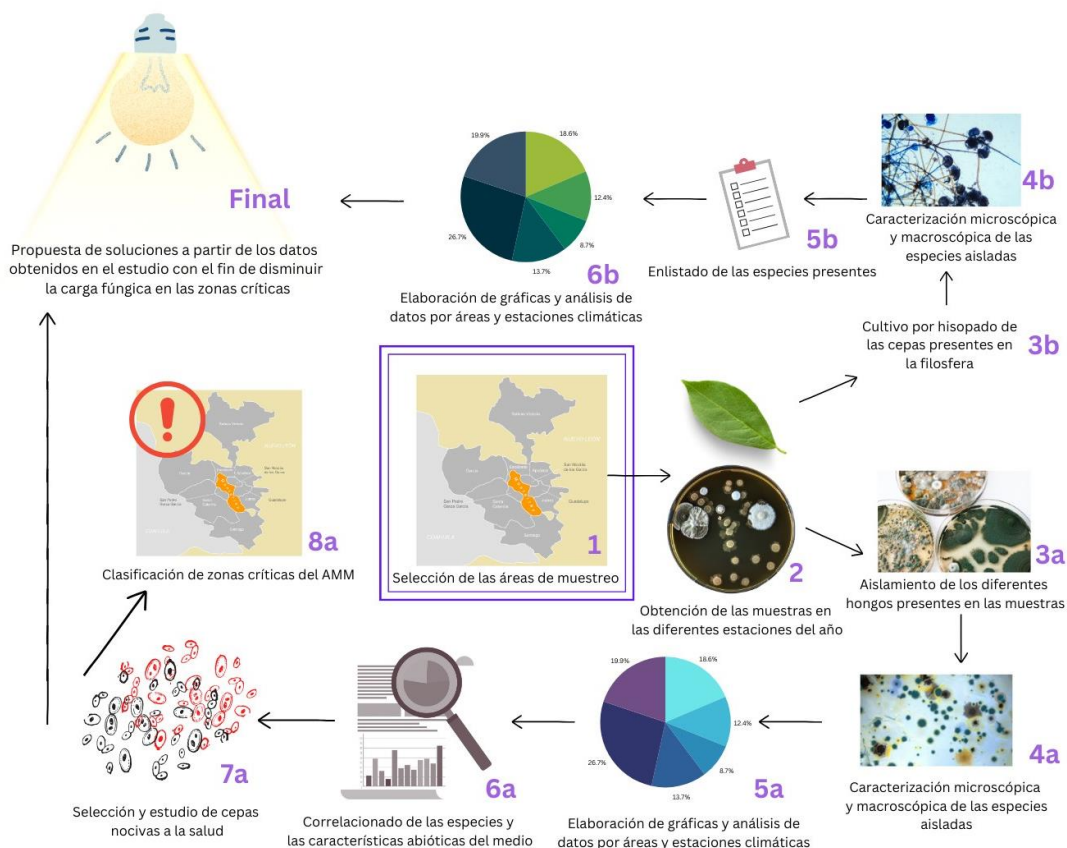


Figura 2 Diagrama de la metodología general a seguir

4.4 Muestréos

Los sitios de muestreo seleccionados se solicitaron de acuerdo al formato (Anexo 1) entregado en las direcciones de ambos sitios, así mismo se estipuló el calendario de muestreo respetando las consideraciones de ambas direcciones (Tabla 3) siendo un muestreo por mes durante un año, asegurándose de tener una distancia apropiada entre muestreos.

Tabla 3 Calendario de muestreos

Día	Mes	Año	Semana
Lunes 6	Marzo	2023	5 al 11 de marzo
Lunes 17	Abril	2023	16 al 22 de abril
Lunes 8	Mayo	2023	7 al 13 de mayo
Lunes 5	Junio	2023	4 al 10 de junio
Lunes 3	Julio	2023	2 al 8 de Julio
Lunes 7	Agosto	2023	6 al 12 de agosto
Lunes 4	Septiembre	2023	3 al 9 de septiembre
Lunes 2	Octubre	2023	1 al 7 de octubre
Lunes 6	Noviembre	2023	5 al 11 de noviembre
Lunes 4	Diciembre	2023	3 al 9 de diciembre
Lunes 15	Enero	2024	14 al 20 de enero
Lunes 12	Febrero	2024	11 al 17 de febrero

Para obtener los datos correspondientes a los contaminantes criterio de cada uno de los muestreos, se seleccionaron estaciones de monitoreo del SIMA, “Estación SIMA Norte 2” para los datos de la Torre de Rectoría y “Estación SIMA Centro” para los datos de la Torre Helicon, cuyas ubicaciones se muestran en la Figura 3.



Figura 3 Mapa de ubicaciones de las estaciones del SIMA y sitios de muestreo

Los muestreos se realizaron en las dos locaciones con alrededor de una hora de diferencia entre ellas, así mismo se hizo un acompañamiento de un miembro de Protección Civil Universitaria en el sitio de la Torre de Rectoría, y por parte de personal de mantenimiento de la Torre Helicon en este mismo sitio, en las Figuras 4-7 se muestran las recolecciones de las muestras de hongos del aire divididas en los meses correspondientes a cada una de las estaciones climáticas.

Se realizó el plaqueo directo utilizando el equipo Microbial air sampler (Modelo FKC-1 Fuxia Medical Technology Co. Ltd.) en las diferentes áreas de interés en dos diferentes alturas; los datos de temperatura y humedad relativa, fueron registrados con un equipo termómetro e higrómetro (Modelo Xiami Mijia Bt) por triplicado para así tomar el promedio de estos datos.



Marzo



Abril



Mayo

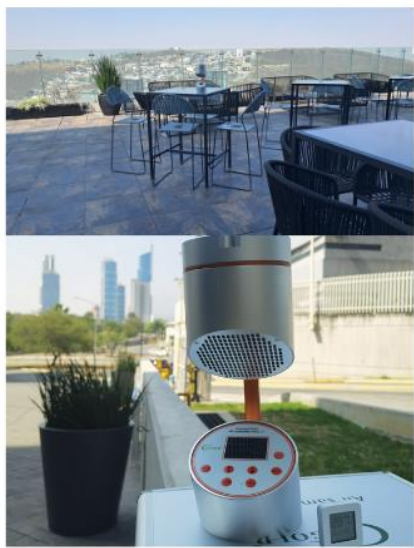


Figura 4 Muestras pertenecientes a la estación climática primavera, arriba pertenecientes a la Torre Rectoría UANL y abajo a la Torre Helicon



Junio



Julio



Agosto



Figura 5 Muestras pertenecientes a la estación climática verano, arriba pertenecientes a la Torre Rectoría UANL y abajo a la Torre Helicon



Septiembre



Octubre



Noviembre



Figura 6 Muestras pertenecientes a la estación climática otoño, arriba pertenecientes a la Torre Rectoría UANL y abajo a la Torre Helicon



Figura 7 Muestras pertenecientes a la estación climática invierno, arriba pertenecientes a la Torre Rectoría UANL y abajo a la Torre Helicon

Para las muestras de filosfera se realizó una recolección de las hojas de filosferas circundantes a las áreas de muestreo, una vez que se recolectaron y etiquetaron en bolsas estériles se llevaron a refrigeración hasta su procesamiento, estos muestreos se realizaron una vez por estación climática en los meses intermedios de cada una de ellas, obteniendo un total de 12 muestras, en las Figuras 8 y 9 se pueden observar las recolecciones.



Figura 8 Muestreo de las filósferas con algunas de las familias de las que se obtuvieron las hojas pertenecientes a) estación climática de primavera y b) estación climática de verano

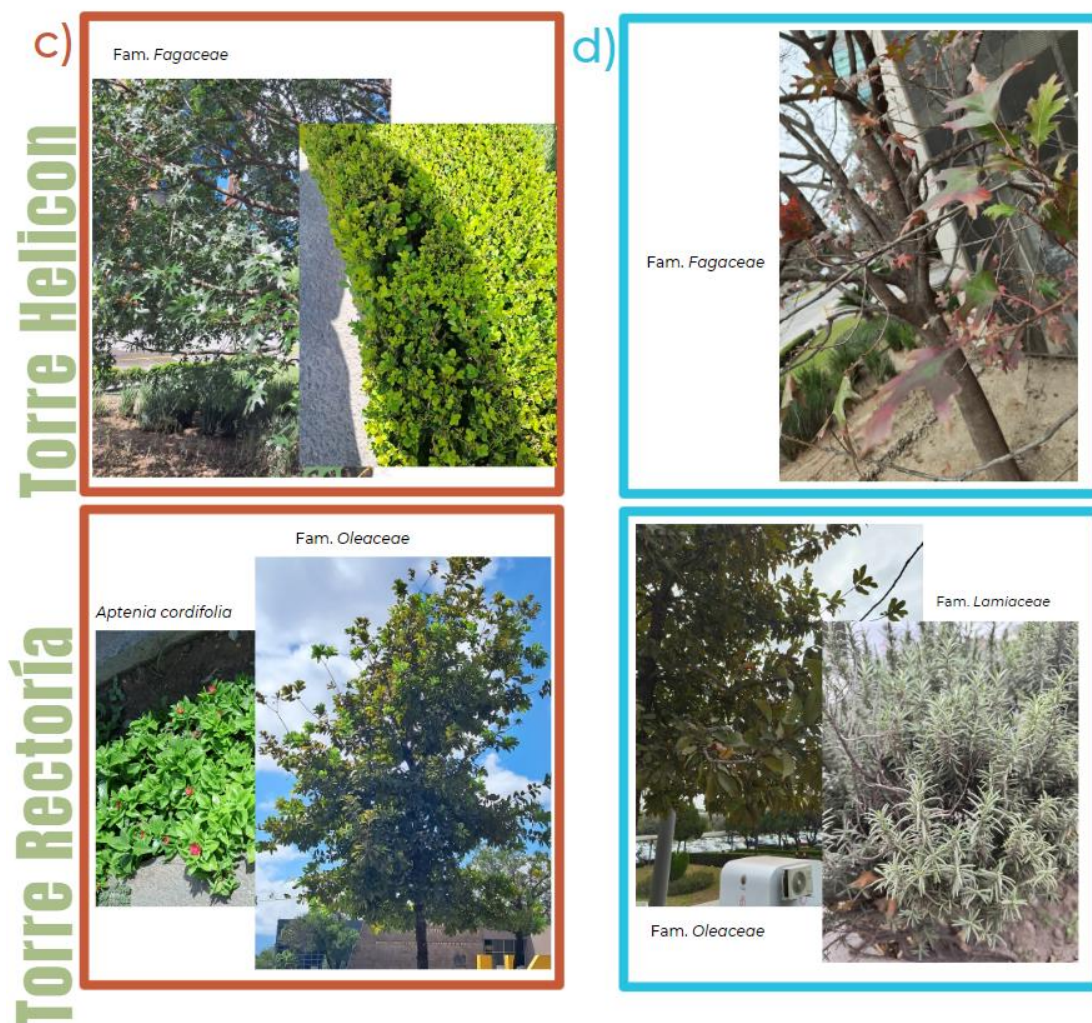


Figura 9 Muestreo de las filósferas con algunas de las familias de las que se obtuvieron las hojas pertenecientes c) estación climática de otoño y d) estación climática de invierno

4.4.1 Aislamiento de hongos

Una vez obtenidas las muestras se pasaron a incubación los diferentes cultivos, esperando a que se pudieran apreciar las diferentes colonias de hongos para poder realizar un aislamiento de cada una de las diferentes cepas, para las condiciones del aislamiento se siguieron las estipuladas por (Zhao, y otros, 2010).

El medio de cultivo utilizado para los muestreos así como los aislamientos fue el medio papa y zanahoria dextrosa adicionado con cloranfenicol y nitrato de sodio (NaNO_3) ajustando a un pH de 5 para estimular el crecimiento de los hongos y que se pudieran observar separaciones adecuadas entre las cepas, en la tabla 4 se desglosan las cantidades y reactivos del mismo.

Tabla 4 Formulación del medio de cultivo PZDA

Composición del medio de cultivo PZDA		
Reactivo	Cantidad	Unidad
Papa	100	g/L

Zanahoria	100	g/L
Dextrosa	30	g/L
Nitrato de Sodio (NaNO ₃)	2	g/L
Ácido tartárico	pH 5	mL
Agar bacteriológico	20	g/L
Cloranfenicol	0.10	g/L

La temperatura de incubación fue de 25°C durante 5 días hasta observar el crecimiento de las colonias en cada una de las muestras.

Para la identificación macroscópica se realizaron aislamientos de cada una de las cepas, se realizaron tinciones con azul de lactofenol en fresco y microcultivos. La identificación de los hongos fue realizada comparando con las claves morfológicas reportadas en distintos manuales de diagnóstico microbiológico en especial de hongos. (Procop, Church, Hall, & Janda, 2020).

Una vez obtenidos e identificados todos los aislados se hicieron preservaciones en agua destilada siguiendo los procedimientos de conservación para hongos estipulados en (Smith & Onions, 1995).

4.4.1.1 Controles negativos

Los controles negativos utilizados para los muestreos fueron dos distintos, uno para asegurar la inocuidad del medio de cultivo, y otro para asegurar la correcta limpieza entre muestreos del equipo, para este último, la limpieza se realizó con etanol al 70% rociado sobre la superficie del equipo una vez terminados los muestreos en cada punto, después de esto se realizó un hisopado sobre la superficie estéril del equipo y este mismo se frotó sobre placas de agar PZDA, ambos controles se incubaron bajo las mismas condiciones y el mismo tiempo que las siembras de los muestreos, con el fin de asegurar una inocuidad de los medios y una correcta limpieza del equipo.

4.4.2 Aislamiento de filósferas

Para el subsecuente tratado de las filósferas se utilizaron cuatro maneras distintas para hacer los cultivos de los hongos presentes en las filósferas:

- a) Estriado: se sumergieron 10 g de hojas en 200 mL de agua estéril y se pusieron en agitación constante durante 5 minutos para poder extraer los microorganismos presentes, una vez que pasó el tiempo, se tomó una asada del agua estéril y se sembraron en agar PZDA sobre las mismas condiciones.
- b) Secado: se sumergieron 10 g de hojas en 200 mL de agua estéril y se pusieron en agitación constante durante 5 minutos para poder extraer los microorganismos presentes, una vez que pasó el tiempo, se tomaron 5 mL del líquido para incubarlos en placas de agar PZDA, estas placas se dejaron abiertas en una campana de seguridad para

secar el agua y solo dejar las esporas presentes en la misma, después de esto se incubaron a las mismas condiciones.

- c) Estampado: se tomó una hoja y se selló su cara inversa sobre una placa de agar PZDA, se incubó bajo las mismas condiciones.
- d) Hisopado: se realizó un hisopado con agua estéril de las caras inversas de las hojas para después pasar este mismo hisopo sobre una placa de agar PZDA e incubarlos en las condiciones correspondientes.

Una vez obtenidos las placas pertenecientes a cada una de estas metodologías (tabla 5) se observó que la más adecuada para proceder con las muestras es la del d) Hisopado, ya que se lograron observar cepas aisladas y menos compactas para facilitar el aislamiento, mientras en el c) Estampado se observa un buen crecimiento de los hongos, sin embargo están en densidades muy altas lo que no permite un aislamiento de las cepas presentes; por último, las metodologías a) Estriado y b) Secado no mostraron ningún crecimiento, por lo que fueron descartados.

Tabla 5 Metodologías para el aislamiento de microorganismos de filosferas

Diferentes metodologías para el aislado de hongos en filosferas			
Estriado	Secado	Estampado	Hisopado
			

4.5 Tratamiento de datos

Para el estudio de la aerobiología y sus implicaciones, los datos obtenidos en la caracterización de los microorganismos presentes en el aire, se realizó una búsqueda bibliográfica para correlacionar estos con los posibles riesgos a la salud que podrían implicar cada una de las especies presentes.

Para ver el cambio de los hongos, y las variables que implican un cambio en sus UFC para ello se utilizaron los datos de los microorganismos obtenidos en las diferentes estaciones del año y los diferentes puntos de muestreo para correlacionar la presencia de estos, sus concentraciones y las condiciones abióticas como la presencia de contaminantes criterio, la temperatura, la humedad relativa y la altitud en las que se tomaron las muestras.

Se clasificaron las temporalidades en las que se encuentra un mayor riesgo de acuerdo con los datos obtenidos sobre la variabilidad de especies de hongos presentes en el aire y su densidad poblacional en las diferentes

estaciones climáticas del año, así como las posibles implicaciones que tendrán sobre la salud de la población.

Se analizaron utilizando el programa estadístico XLSTAT, mediante análisis de covarianzas, pruebas de correlaciones de Pearson y pruebas de t para muestras independientes, la biodiversidad se estudió utilizando las diversidades alfa, beta y gamma.

Capítulo 5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Muestreos

5.1.1 Muestreos de hongos aerotransportados

De los muestreos realizados en cada uno de los meses, se obtuvieron cuatro muestras en placas de agar PZDA siendo un total de 48 durante todo el periodo de muestreo, las cuales tras la incubación mostraron un crecimiento óptimo y suficiente para poder comenzar a realizar el aislamiento de las cepas que se encontraban en cada una de estas placas, en las figuras 10-21 podemos observar los duplicados por altura para cada uno de los sitios de muestreo, a partir de las características morfológicas se realizó la resiembra de las diferentes cepas presentes, así mismo, el conteo de UFC se realizó en cada una de estas placas, para después poder realizar un conteo promedio de estas.

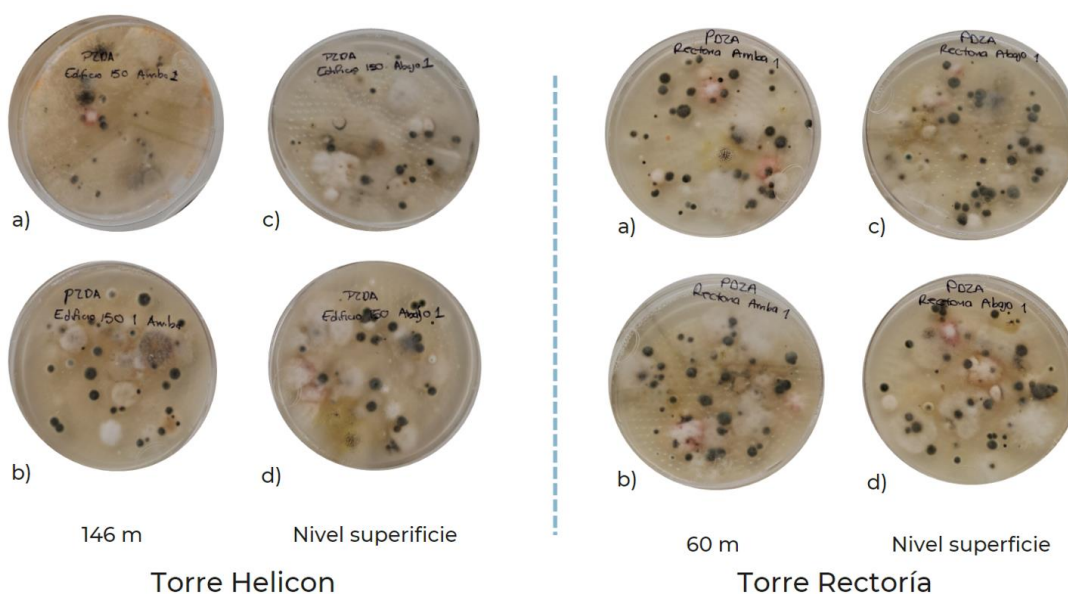


Figura 10 Muestras de hongos obtenidas en el mes de Marzo del 2023, a y b correspondientes a la altura máxima de cada sitio y c y d la altura de nivel superficie

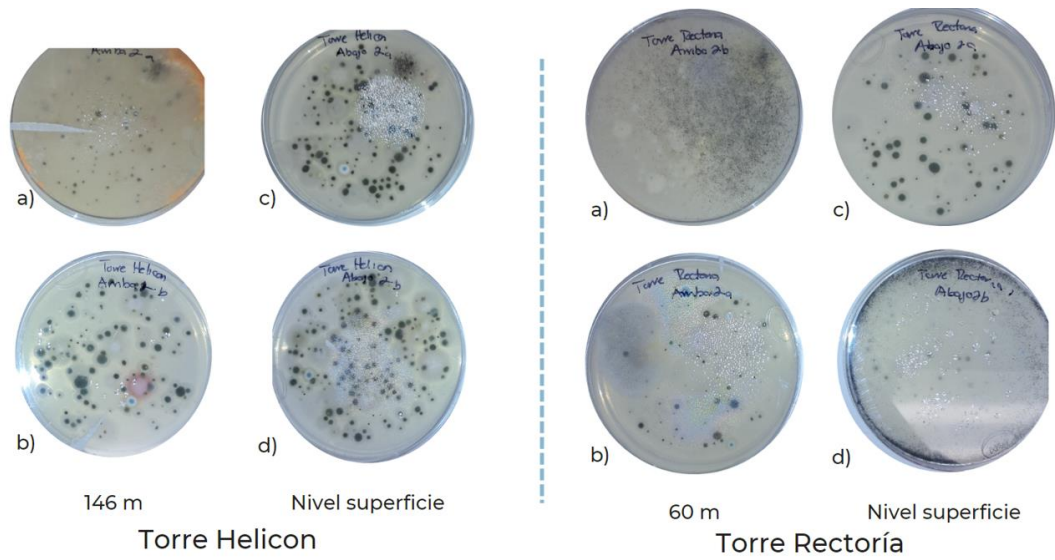


Figura 11 Muestras de hongos obtenidas en el mes de Abril del 2023, a y b correspondientes a la altura máxima de cada sitio y c y d la altura de nivel superficie

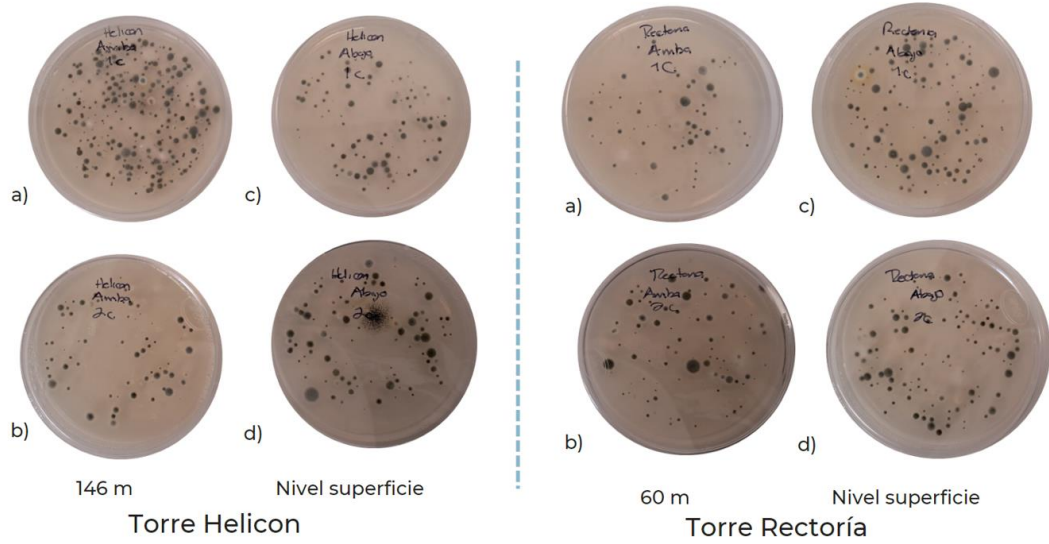


Figura 12 Muestras de hongos obtenidas en el mes de Mayo del 2023, a y b correspondientes a la altura máxima de cada sitio y c y d la altura de nivel superficie

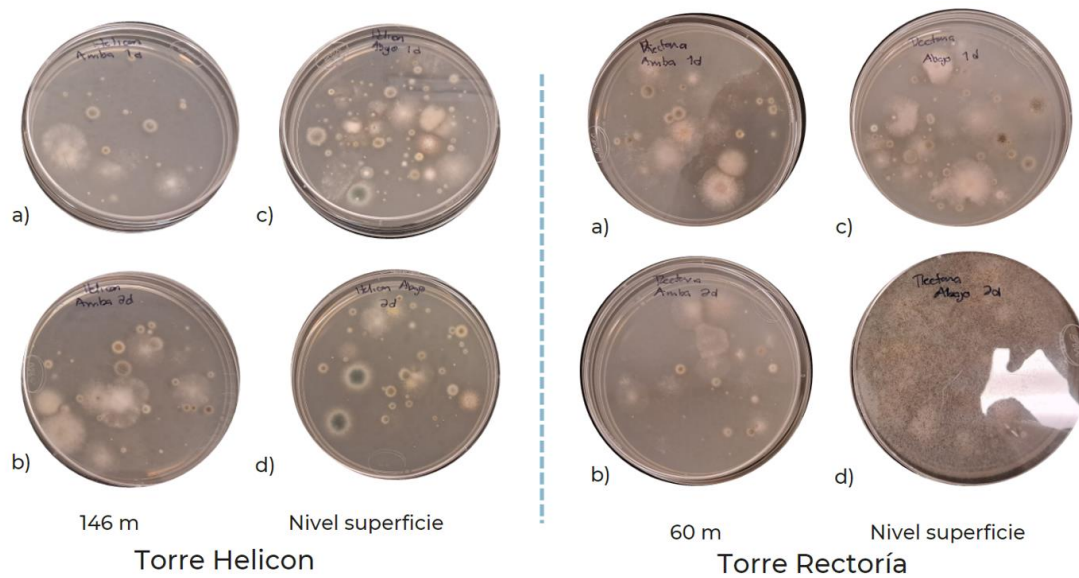


Figura 13 Muestras de hongos obtenidas en el mes de Junio del 2023, a y b correspondientes a la altura máxima de cada sitio y c y d la altura de nivel superficie

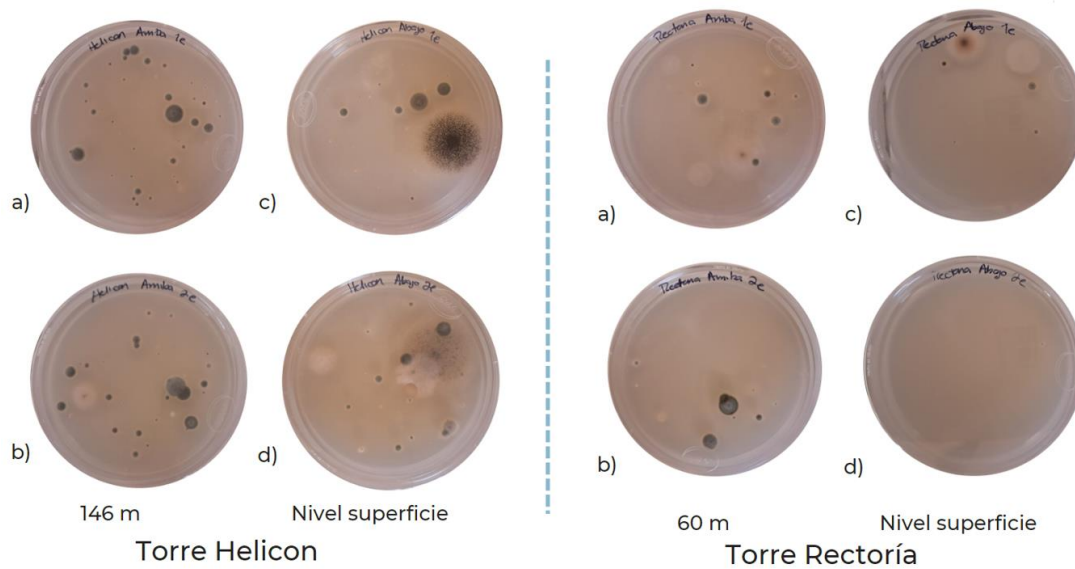


Figura 14 Muestras de hongos obtenidas en el mes de Junio del 2023, a y b correspondientes a la altura máxima de cada sitio y c y d la altura de nivel superficie

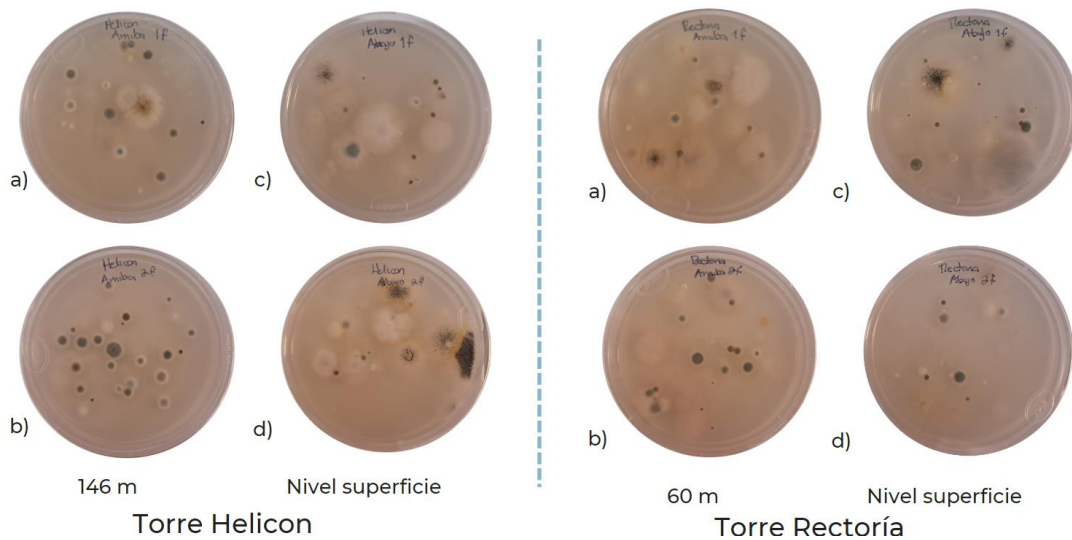


Figura 15 Muestras de hongos obtenidas en el mes de Agosto del 2023, a y b correspondientes a la altura máxima de cada sitio y c y d la altura de nivel superficie

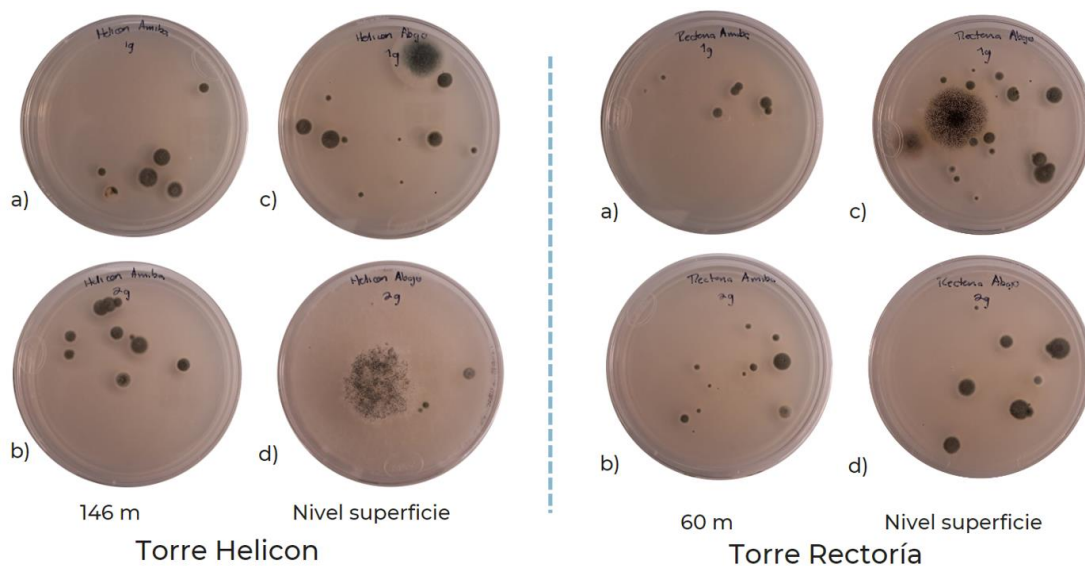


Figura 16 Muestras de hongos obtenidas en el mes de Septiembre del 2023, a y b correspondientes a la altura máxima de cada sitio y c y d la altura de nivel superficie

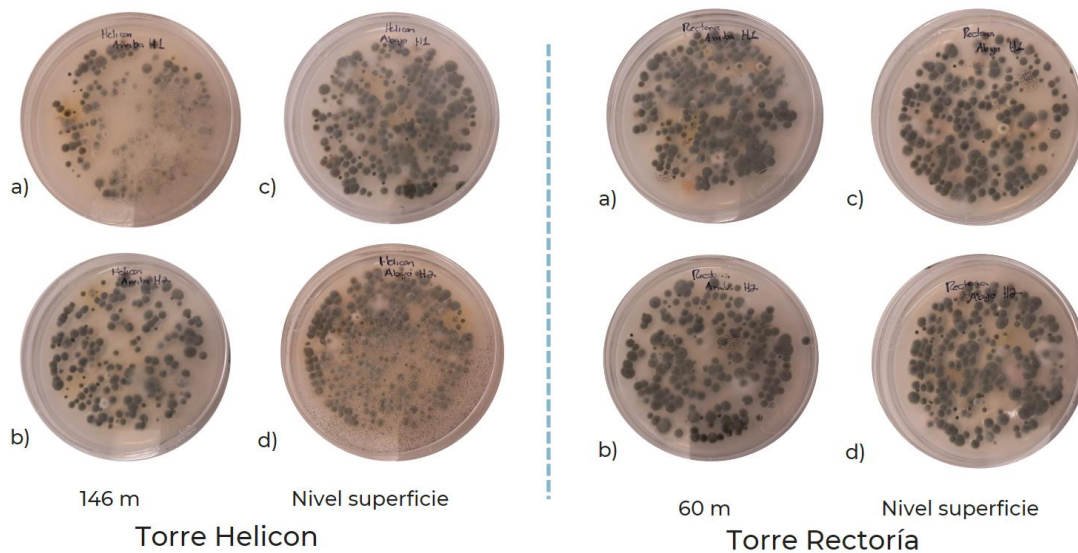


Figura 17 Muestras de hongos obtenidas en el mes de Octubre del 2023, a y b correspondientes a la altura máxima de cada sitio y c y d la altura de nivel superficie

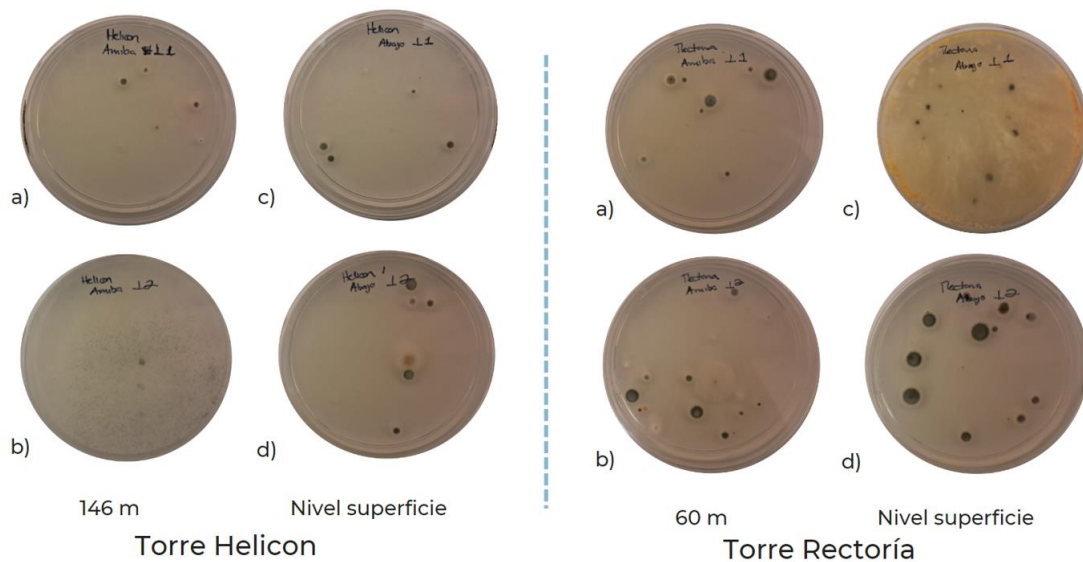


Figura 18 Muestras de hongos obtenidas en el mes de Noviembre del 2023, a y b correspondientes a la altura máxima de cada sitio y c y d la altura de nivel superficie

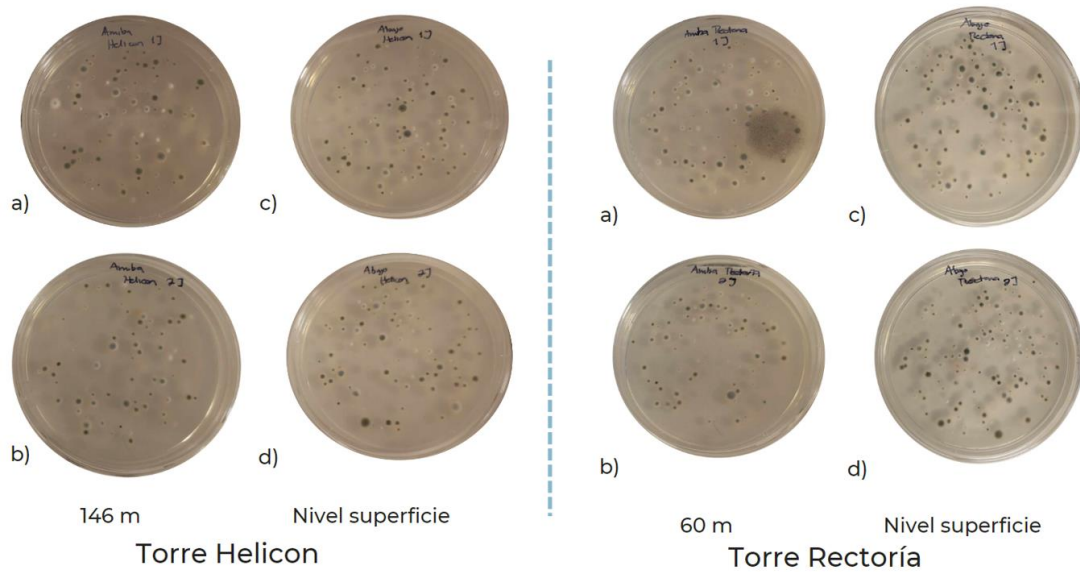


Figura 19 Muestras de hongos obtenidas en el mes de Diciembre del 2023, a y b correspondientes a la altura máxima de cada sitio y c y d la altura de nivel superficie

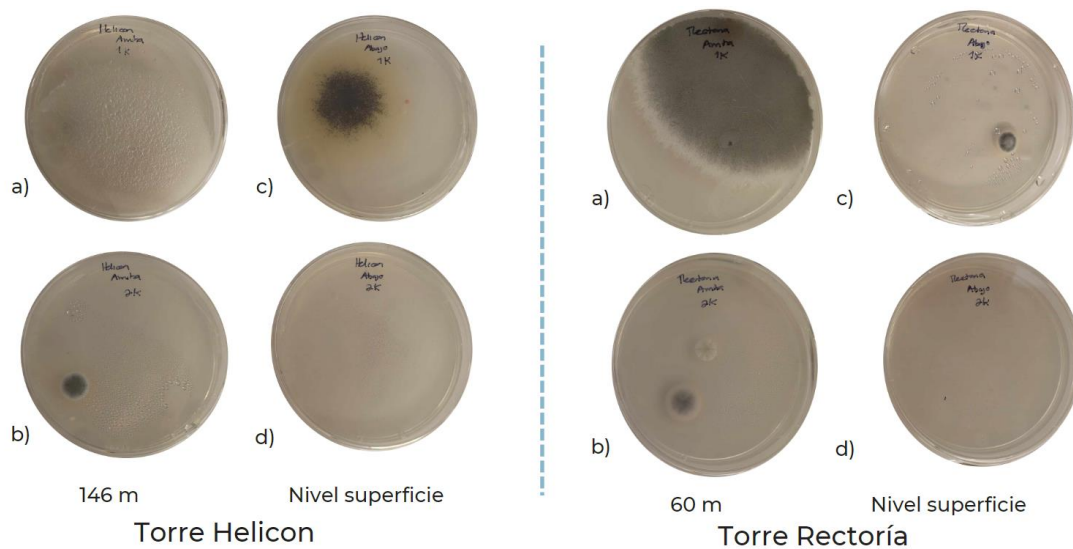


Figura 20 Muestras de hongos obtenidas en el mes de Enero del 2024, a y b correspondientes a la altura máxima de cada sitio y c y d la altura de nivel superficie

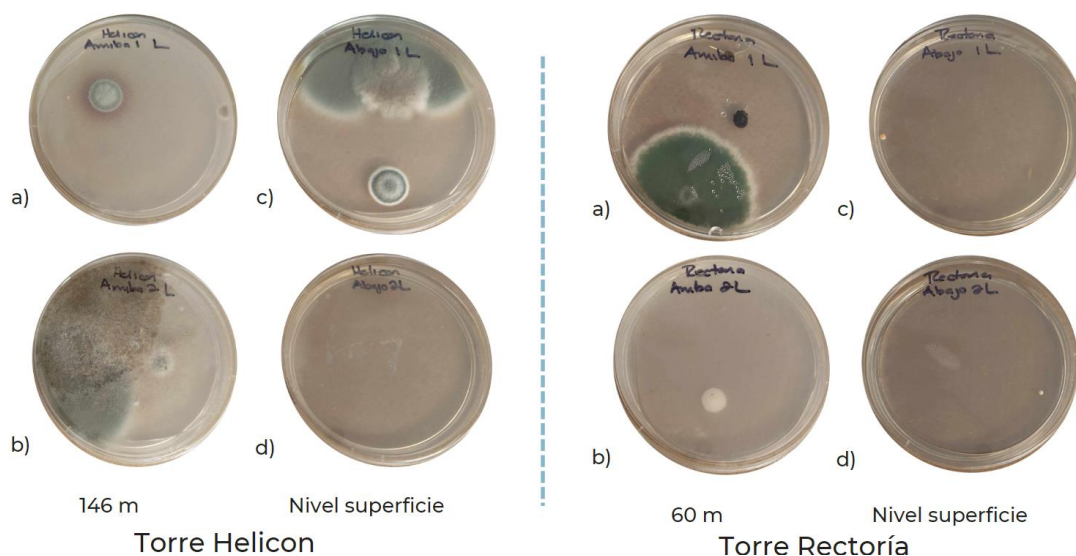


Figura 21 Muestras de hongos obtenidas en el mes de Febrero del 2024, a y b correspondientes a la altura máxima de cada sitio y c y d la altura de nivel superficie

Para poder hacer una resiembra se utilizaron diferentes manuales de identificación de hongos así como libros de características macroscópicas de las diferentes cepas que se presentaron en los cultivos, aprovechando principalmente las coloraciones de las colonias, la textura que presentaban y también aquellas que llegaban a generar un cambio en la coloración del medio de cultivo. (Herrera & Ulloa , 1998) (Lacey & West, 2006) (Grant Smith, 1990)

5.1.2 Muestreo de filosferas

Para las muestras de filosferas se trabajó con muestras de tres diferentes especies de las cuales se lograron obtener hojas para todas las estaciones climáticas, una perteneciente al género *Ligustrum sp.*, otra el género *Quercus sp.* y por ultimo de helechos identificados mediante comparativas morfológicas (figura 22).

Una vez que se determinó que el hisopado fue la forma más eficiente de obtener los cultivos de microorganismos presentes en las filosferas, se realizaron cultivos para cada una de las muestras (Figura 23), en los cuales podemos observar que no se mostró ningún crecimiento en las dos primeras estaciones climáticas, esto podría ser ya que para la preservación a largo plazo de hongos es importante tener aislados previos en algún medio nutritivo para asegurar que sigan existiendo esporas activas (Espinell-Ingroff, Montero, & Martin-Manzuelos, 2004) de acuerdo a (Smith & Onions, 1995) cada género tiene una distinta capacidad de sobrevivencia en a diferentes condiciones, por lo que creemos que la pérdida en la viabilidad de los hongos presentes en estas filosferas se haya debido a un mal almacenamiento y preservación de las muestras, por lo que se continuó trabajando solo con las filosferas pertenecientes a las estaciones climáticas de otoño e invierno.



Hojas de la estación climática primavera



Hojas de la estación climática verano



Hojas de la estación climática otoño



Hojas de la estación climática invierno

Figura 22 Muestras de filsoferas obtenidas

A partir de las colonias obtenidas en los cultivos se realizaron resiembras para poder continuar con la identificación de los hongos presentes en estas muestras de filsoferas.

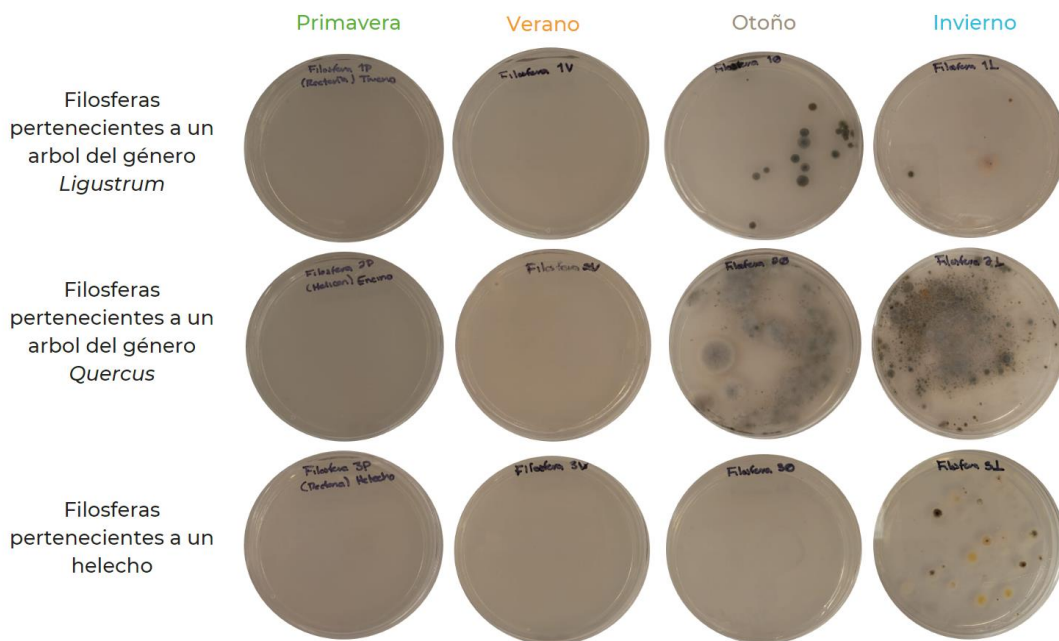


Figura 23 Cultivos de filsoferas por hisopado en agar PZDA

5.2 Datos de contaminantes criterio

Los datos de concentraciones de los contaminantes criterio se tomaron en el momento del muestreo para cada una de los sitios, utilizando la herramienta de “Mapa Índice Aire y Salud” proporcionada por el SIMA (SIMA, 2024), se tabularon los datos obtenidos en la tabla 6, en donde se pueden observar casillas con la leyenda “ND” debido a que los detectores de estos contaminantes criterio en específico se encontraban en mantenimiento o fuera de servicio, sin embargo como se puede observar en el Anexo 3 para el análisis estadístico se completaron los datos de estas casillas con el promedio de las concentraciones.

Tabla 6 Datos de contaminantes criterio

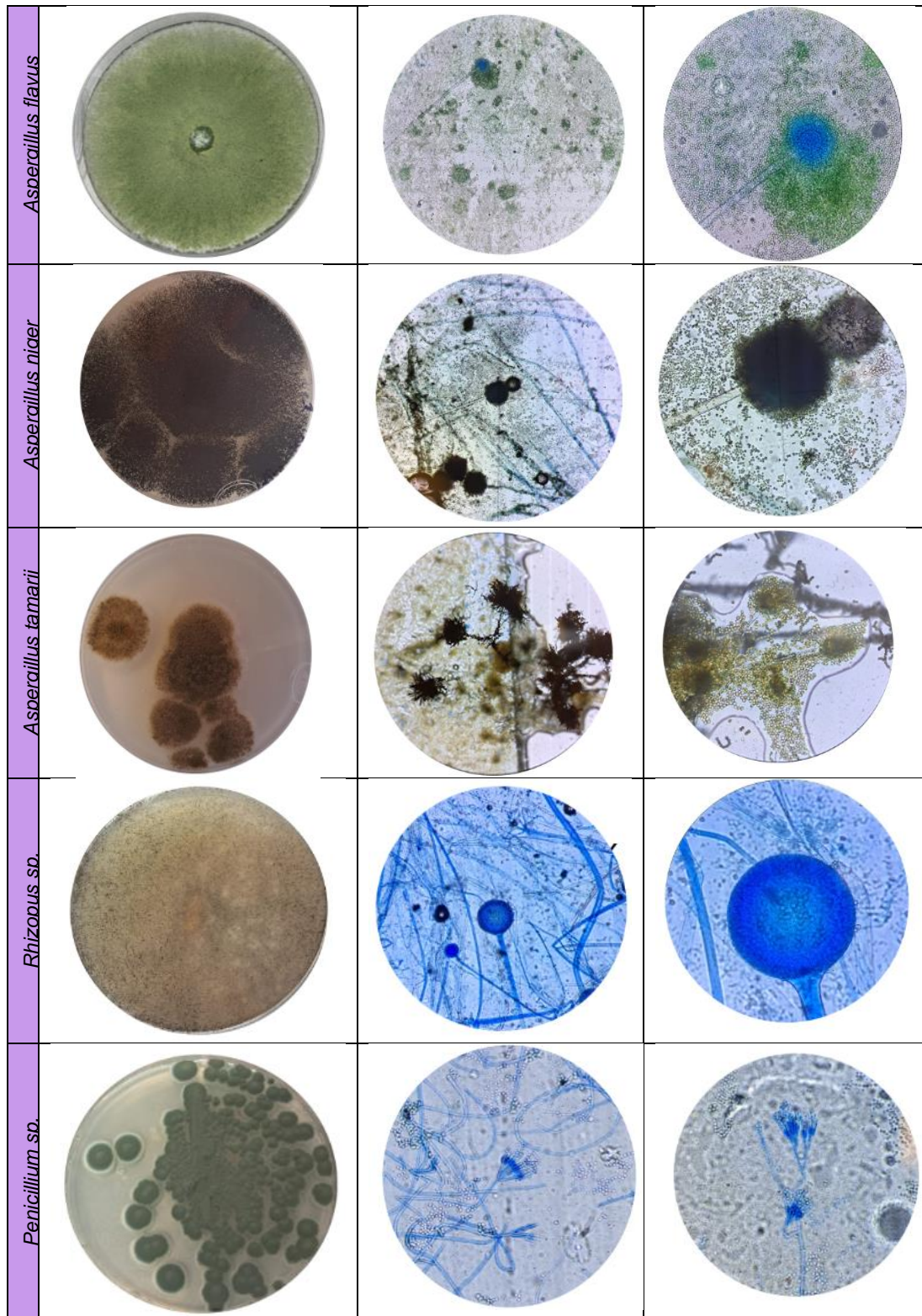
Datos de contaminantes criterio												
Mes	Parámetros y ubicación											
	Bióxido de azufre (SO ₂) (ppm)		Bióxido de nitrógeno (NO ₂) (ppm)		Monóxido de carbono (CO) (ppm)		Ozono (O ₃) (ppm)		Partículas menores a 10 micras (PM ₁₀) (µg/m ³)		Partículas menores a 2.5 micras (PM _{2.5}) (µg/m ³)	
	Rectoría	Helicon	Rectoría	Helicon	Rectoría	Helicon	Rectoría	Helicon	Rectoría	Helicon	Rectoría	Helicon
Marzo	3.53	3.59	20	16.1	1.47	2.23	36	57	101.72	119.63	46.76	63.86
Abril	4.52	3.31	19.6	5.80	1.50	3.52	28	32	70.88	47.68	13.19	18.74
Mayo	5.10	3.06	22.3	19.10	1.06	0.96	49	57	85.61	80.52	41.97	45.19
Junio	6.82	3.22	25.3	20.1	1.05	1.25	37	49	78.37	91.72	ND	ND
Julio	2.38	2.62	17.8	15.9	1.19	1.21	55	12	ND	33.63	33.03	11.25
Agosto	4.26	4.2	17	9	1.22	1.33	66	78	83.53	63.27	26	22.04
Septiembre	5.32	2.97	21.1	19.4	1.26	0.77	32	28	40.11	73.37	12.46	19.6
Octubre	3.16	2.1	18.7	13.8	0.9	0.64	ND	17	42.71	22.3	12.49	6.22
Noviembre	4.75	3.01	25.4	21.5	1.72	1.08	44	35	74.43	63.99	29.38	18.51
Diciembre	3.84	3.02	57.6	19.8	2.23	0.68	12	8	107.52	49.14	28.14	ND
Enero	4.43	6.22	20.6	23.6	1.52	0.77	14	6	88.29	82.16	16.71	21.08
Febrero	3.42	5.32	18.9	20.7	1.71	1.89	20	15	54.80	60.57	5.54	10.85

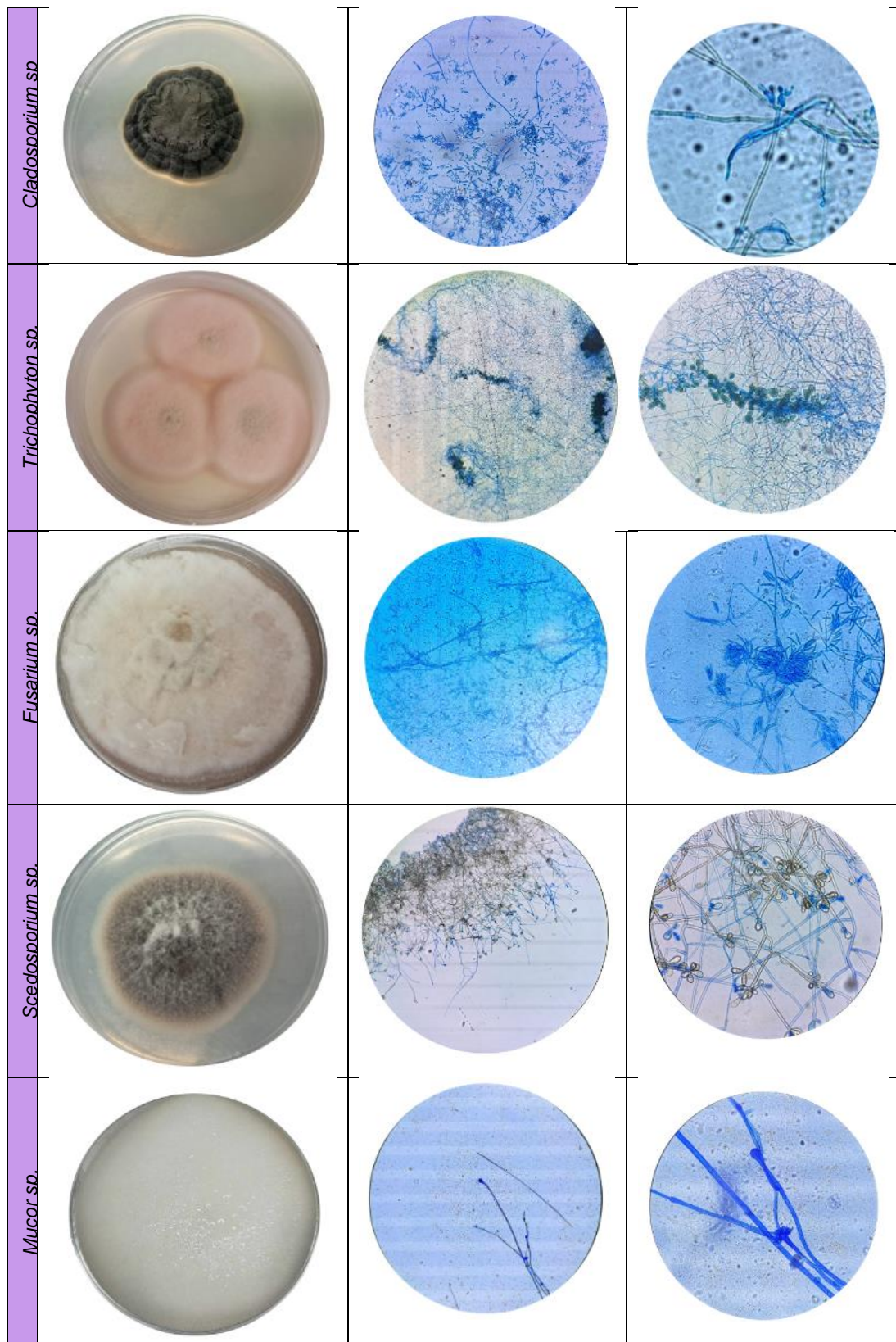
5.3 Caracterización morfológica

La caracterización morfológica se realizó para cada muestreo, tanto las muestras de filosferas como las de hongos suspendidos en el aire, en la Tabla 7 se muestran las macro y micrografías de cada uno de los géneros caracterizados, para poder realizar una correcta identificación se realizaron múltiples cultivos y tinciones para poder observar correctamente las micro y macro estructuras que corresponden a cada uno de los géneros fúngicos mencionados a continuación.

Tabla 7 Macro y micrografías de los géneros encontrados

Fotos del cultivo macroscópico y de las tinciones de los géneros encontrados			
	Cultivo puro	Aumento 10x	Aumento 40x





Las características principales para cada uno de los géneros presentes:

- *Aspergillus* spp. Se pueden observar conidióforos con arreglo radial con esporas de coloración dependiente a la especie, estipes de pared

lisa y una vesícula esférica, las colonias deben ser filamentosas con crecimiento rápido, en *A. niger* se puede observar un oscurecimiento del cultivo una vez que llega a su fase madura, mientras que en *A. flavus* podemos observar una coloración verde fuerte desde el inicio del cultivo, mientras que en *A. tamarii* la coloración nunca sube de tonalidades marrones.

- *Rhizopus sp.* Se observa un esporangio liso con presencia de esporangiosporas, hifas rizoides, las colonias son pertenecientes a un hongo filamentoso blanco con pequeños puntos negros dispersados por la colonia de manera homogénea.
- *Penicillium sp.* Logramos observar un conidióforo multiverticiliado con arreglo vertical, conidios lisos elipsoidales, característicos del género, además que en las colonias macroscópicas se puede observar una coloración azul verdosa con esquinas brillantes de color blanco aterciopeladas.
- *Cladosporium sp.* A nivel microscópico observamos conidios terminales pequeñas y una ramoconidia con dos ramificaciones con esporas esféricas, a nivel macroscópico se observan colonias aterciopeladas que tienen pliegues radiales y con coloración verde oscura casi café.
- *Trichophyton sp.* Observamos hifas largas y delgadas con conidios en racimos y con formas globulares, la principal característica de este género a nivel macroscópico es una coloración roja sobre el medio de cultivo PDA, además de colonias blancas algodonosas con ligeras tonalidades rojizas anaranjadas.
- *Fusarium sp.* Podemos observar una macroconidia alargada con curvatura en forma de media luna, además no hay unión entre las conidias, las colonias macroscópicas tienen una tonalidad blanca cremosa y son algodonosas.
- *Scedosporium sp.* Se logran observar hifas septadas, con un conidio único esférico, a nivel macroscópico las colonias son blancas algodonosas, que con el tiempo toman una coloración grisácea.
- *Mucor sp.* Las hifas son largas que pueden venir en racimo lleno de esporangiosporas globulares que son capaces de doblarse, las colonias tienen la particularidad de tener una mucosidad que las envuelve, son blancas algodonosas y brillantes gracias a esta característica.

Para todas las caracterizaciones se utilizaron diversos manuales sobre hongos microscópicos y esporas presentes en aire. (Aquí también debo ir por los manuales al lab)

5.3.1 Orden Endomicetales

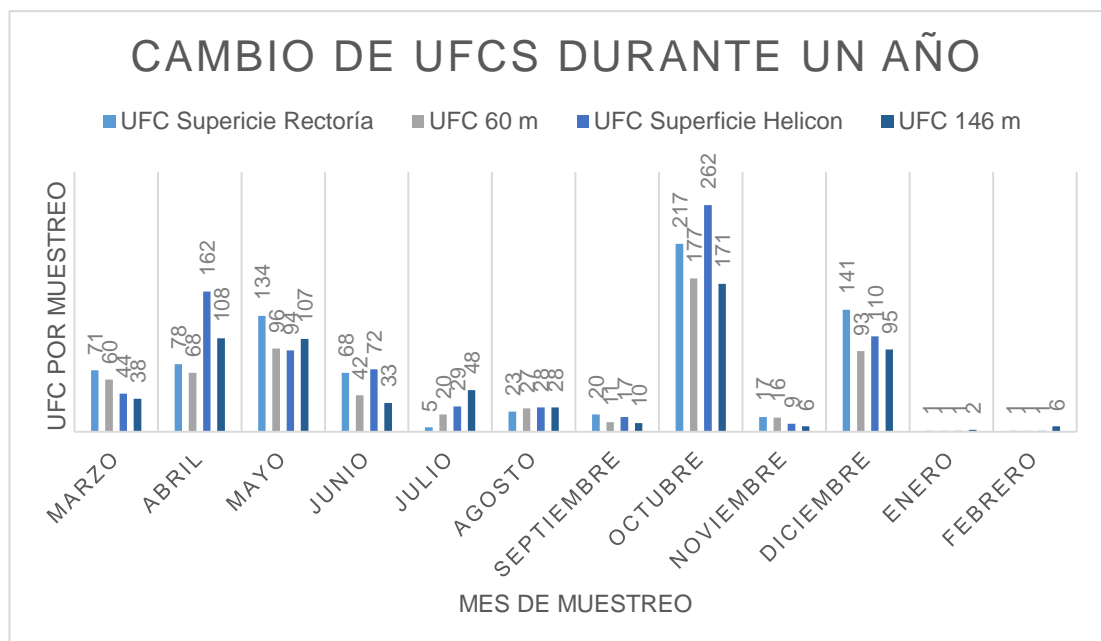
Además de encontrar hongos filamentosos, se lograron obtener diez cepas de levaduras (Figura 24), las cuales presentan distintas coloraciones y texturas a nivel macroscópico, sin embargo no se logró hacer una diferenciación entre especies ya que a nivel microscópico todas presentan la misma morfología, por lo que todas se clasificaron como hongos pertenecientes al orden de los Endomicetales.



Figura 24 Levaduras encontradas durante los muestreos de hongos aerotransportados

5.3.2 Diversidad biológica

Para el conteo de UFC de los meses de muestreo se realizó un promedio para las duplicas y se contabilizó en la gráfica 2, donde podemos observar que las poblaciones de hongos tienden a ser altamente cambiantes.



Gráfica 2 UFCs durante el año de muestreo Marzo 2023 a Febrero 2024

La diversidad de los hongos es alta, y podemos ver como uno de los principales hongos que se presentan en la mayoría de los meses de muestreo es el género de *Cladosporium sp.* como se puede observar en las Tablas 8 y 9, este género se presentó en un total de 11 meses de los 12 de muestreo, lo que coincide con el estudio realizado por (Fröhlich-Nowoisky J. , Pickersgill, Després , & Pöschl, 2009) donde se detectó la presencia de este mismo género en todas menos 1 de las muestras de aire, por lo que podemos decir que *Cladosporium sp.* tiene una distribución facilitada a través del aire.

Además, se determinó que los géneros que tuvieron una mayor presencia fueron:

- *Cladosporium sp.* que se encontró en el 85% de las muestras de aire.
- *Fusarium sp.* que se encontró en el 60% de las muestras de aire.
- *Aspergillus spp.* con presencia en el 35% de las muestras de aire, pero de quien más diferentes cepas se pudieron aislar, de quien en total se obtuvieron 3 cepas.
- Los Endomicetales tuvieron una baja presencia, pero una gran diversidad en morfologías.

Tabla 8 Géneros de hongos encontrados por sitio de muestreo y altura, meses de Marzo a Agosto 2023

Géneros de hongos encontrados en el aire																								
Género	Marzo				Abril				Mayo				Junio				Julio				Agosto			
	R. 0 m	R. 60 m	H. 0 m	H. 146 m	R. 0 m	R. 60 m	H. 0 m	H. 146 m	R. 0 m	R. 60 m	H. 0 m	H. 146 m	R. 0 m	R. 60 m	H. 0 m	H. 146 m	R. 0 m	R. 60 m	H. 0 m	H. 146 m				
<i>Aspergillus spp.</i>	x	x	x	x				x					x								x			
<i>Penicillium sp.</i>				x		x	x	x	x	x	x	x			x					x		x	x	x
<i>Trichophyton sp.</i>	x	x						x																
<i>Gymnosporangium sp.</i>				x								x												
<i>Fusarium sp.</i>	x	x	x	x	x			x	x	x		x	x	x	x	x					x	x	x	x
<i>Rhizopus sp.</i>						x										x								
<i>Cladosporium sp.</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
<i>Scedosporium sp.</i>		x										x		x	x	x	x							x
<i>Cephalosporium sp.</i>												x						x						
<i>Mucor sp.</i>																								
Orden Endomicetales		x	x	x								x		x		x						x	x	

Tabla 9 Géneros de hongos encontrados por sitio de muestreo y altura, meses de Septiembre 2023 a Febrero 2024

Géneros de hongos encontrados																								
Género	Septiembre				Octubre				Noviembre				Diciembre				Enero				Febrero			
	R. 0 m	R. 60 m	H. 0 m	H. 146 m	R. 0 m	R. 60 m	H. 0 m	H. 146 m	R. 0 m	R. 60 m	H. 0 m	H. 146 m	R. 0 m	R. 60 m	H. 0 m	H. 146 m	R. 0 m	R. 60 m	H. 0 m	H. 146 m				
<i>Aspergillus spp.</i>	x				x	x	x									x					x			
<i>Penicillium sp.</i>				x												x					x			
<i>Trichophyton sp.</i>					x	x																		x
<i>Gymnosporangium sp.</i>									x															
<i>Fusarium sp.</i>					x	x	x	x					x	x	x	x	x							
<i>Rhizopus sp.</i>			x					x	x					x										x
<i>Cladosporium sp.</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x								x
<i>Scedosporium sp.</i>	x				x	x	x	x																x
<i>Cephalosporium sp.</i>						x																		
<i>Mucor sp.</i>																				x				
Orden Endomicetales					x			x					x									x		

La Tabla 10 muestra una comparativa de los géneros que se encontraron contra aquellos que se pudieron caracterizar en estudios previos en el AMM, de entre lo que podemos recalcar que se aisló por primera vez de muestras de aire a los géneros *Aspergillus spp.*, *Gymnosporangium sp.*, *Scedosporium sp.* y *Mucor sp.*

Tabla 10 Géneros previamente encontrados en el AMM

Géneros encontrados previamente y en este estudio			
Género	Lugar de muestreo	Obtenidos en este estudio	Referencia
<i>Monosporium sp.</i>	San Nicolás de los Garza, N.L.	No	(Verástegui Rubio, y otros, 2015)
<i>Bipolaris sp.</i>	San Nicolás de los Garza, N.L.	No	(Verástegui Rubio, y otros, 2015)
<i>Trichophyton sp.</i>	San Nicolás de los Garza, N.L.	Si	(Verástegui Rubio, y otros, 2015)
<i>Curvularia sp.</i>	San Nicolás de los Garza, N.L.	No	(Verástegui Rubio, y otros, 2015)
<i>Aspergillus sp.</i>	San Nicolás de los Garza, N.L.	Si	(Verástegui Rubio, y otros, 2015)
<i>Rhizopus sp.</i>	San Nicolás de los Garza, N.L.	Si	(Verástegui Rubio, y otros, 2015)
<i>Cladosporium sp.</i>	San Nicolás de los Garza, N.L.	Si	(Verástegui Rubio, y otros, 2015)
<i>Monilia sp.</i>	San Nicolás de los Garza, N.L.	No	(Verástegui Rubio, y otros, 2015)
<i>Fusarium sp.</i>	San Nicolás de los Garza, N.L.	Si	(Verástegui Rubio, y otros, 2015)
<i>Cephalosporium sp.</i>	San Nicolás de los Garza, N.L.	Si	(Verástegui Rubio, y otros, 2015)
<i>Alternaria sp.</i>	Monterrey, N.L.	No	(Nava Palacios, García S., & Sánchez-Yañez, 2006)
<i>Penicillium sp.</i>	Monterrey, N.L.	Si	(Nava Palacios, García S., & Sánchez-Yañez, 2006)
<i>Metarhizium sp.</i>	Monterrey, N.L.	No	(Nava Palacios, García S., & Sánchez-Yañez, 2006)
<i>Bipolaris sp.</i>	Monterrey, N.L.	No	(Nava Palacios, García S., & Sánchez-Yañez, 2006)

5.4 Análisis estadísticos

Para los análisis estadísticos se utilizó el software XLSTAT Premium, utilizando los datos del Anexo 3.

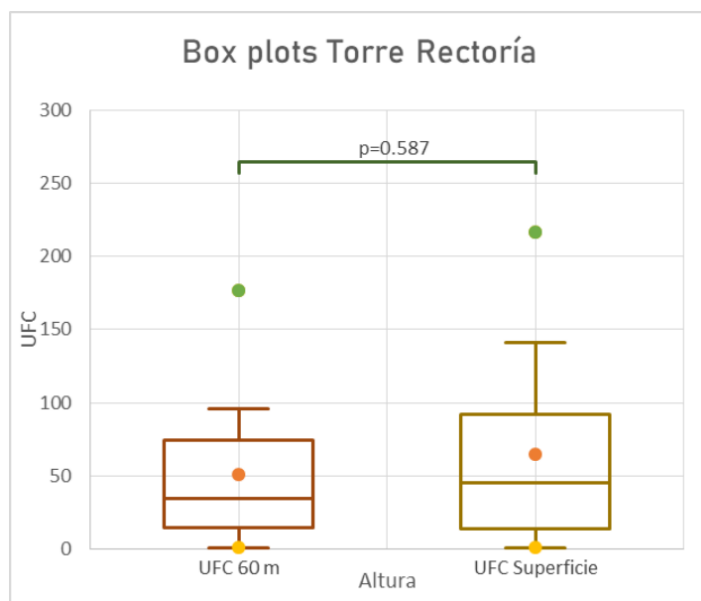
Los factores a tomar en cuenta para los análisis fueron la altura, la temperatura, la humedad relativa, las concentraciones de los contaminantes criterio (bióxido de azufre, bióxido de nitrógeno, monóxido de carbono, ozono, partículas menores a 10 micras y partículas menores a 2.5 micras) y las UFC promedio de cada uno de los sitios (Tabla 11-13).

Tabla 13 Desglose de datos por mes de los muestreos de hongos aerotransportados, Enero y Febrero 2024

Factores abióticos y UFC											
Mes de muestreo	Sitio de muestreo	Datos obtenidos en campo			Datos obtenidos mediante el SIMA						UFC (promedio de 2 réplicas)
		Altura	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Bióxido de azufre (SO ₂)	Bióxido de nitrógeno (NO ₂)	Monóxido de carbono (CO)	Ozono (O ₃)	Partículas menores a 10 micras (PM ₁₀)	Partículas menores a 2.5 micras (PM _{2.5})	
Enero	Rectoría	60 m	33.1	60							1±0.35
		Superficie	35.7	53							1±0.35
	Helicon	146 m	27.1	66.5							2±0.70
		Superficie	30.1	64							1±0.70
Febrero	Rectoría	60 m	19.7	41							1±0.71
		Superficie	19	37							1±0
	Helicon	146 m	17.6	42							6±2.51
		Superficie	16.2	45							1±1.12

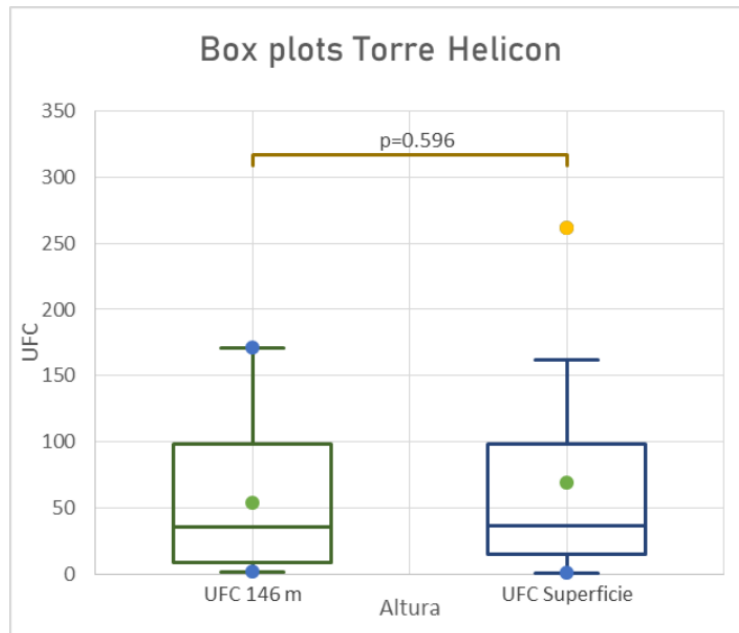
Una vez obtenidos estos datos se realizaron los siguientes análisis estadísticos para poder obtener una mejor descripción de los datos obtenidos.

5.4.1 Pruebas de relación sobre la altura y las UFC



Gráfica 3 Box plots de diferencias de UFC en diferentes alturas, Torre Rectoría

Para comprobar que la diferencia observada de UFC, se realizó una prueba t para dos muestras independientes, en donde se obtuvo con un alfa de 0.05 un valor p de 0.587, puesto que el valor de p es mayor a la significancia de alfa, no se puede rechazar la hipótesis nula, que nos dice que la diferencia entre las medias es igual a 0, por lo que no hay una diferencia significativa entre las UFC obtenidas a 60 m de altura en comparación con las de la superficie para el sitio de muestreo correspondiente a la Torre de Rectoría (gráfica 3).



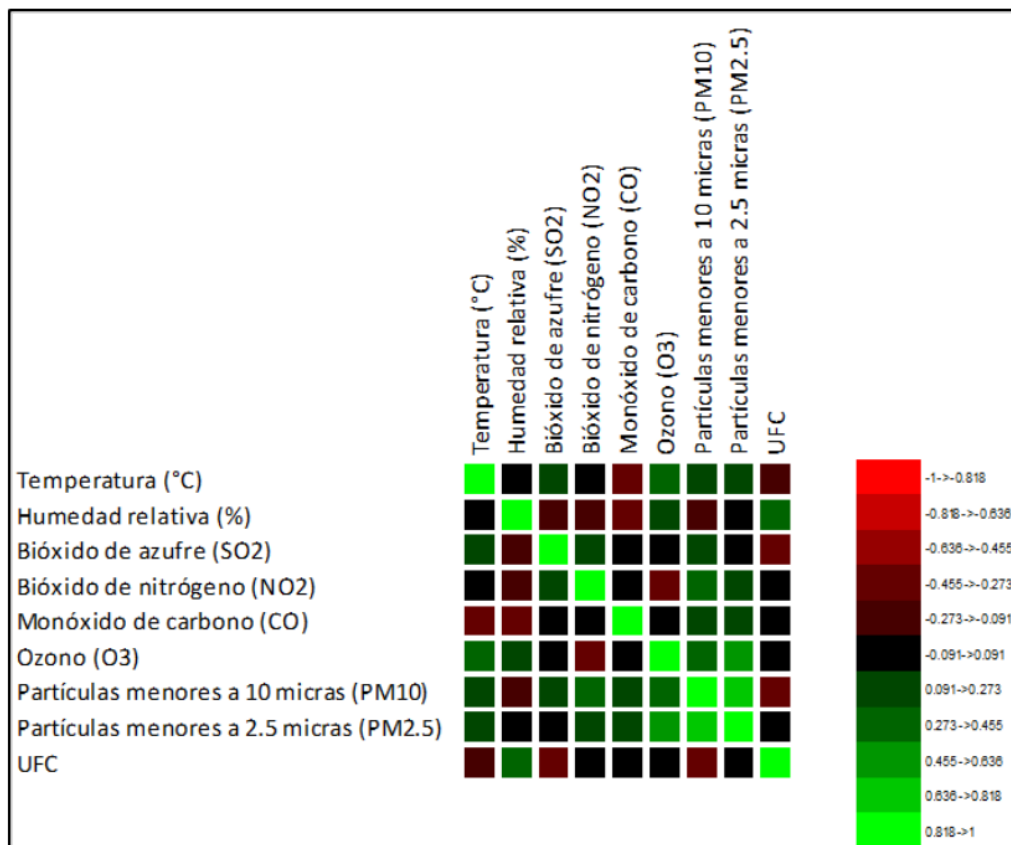
Gráfica 4 Box plots de diferencias de UFC en diferentes alturas, Torre Helicon

De igual manera para comprobar que la diferencia de UFC, se realizó la prueba t para dos muestras independientes, en donde se obtuvo con un alfa de 0.05 un valor p de 0.596, puesto que el valor de p es mayor a la significancia de alfa, no se puede rechazar la hipótesis nula, que nos dice que la diferencia entre las medias es igual a 0, por lo que no hay una diferencia significativa entre las UFC obtenidas a 146 m de altura en comparación con las de la superficie para el sitio de muestreo correspondiente a la Torre Helicon (gráfica 4).

En este estudio se encontró una disminución del 24.3% de UFC a 60 m de altura en contra con las UFC medidas en superficie en la Torre de Rectoría y una disminución del 23.2% a 146 m de altura contra la superficial en la Torre Helicon; En estudios de otras regiones se ha encontrado una disminución del 46.6%, el punto más alto siendo el pico del Monte Jodo con una altura de 2839 m sobre el nivel del mar y el pico más bajo la Universidad Toyama, Japón con 23 m de altura sobre el nivel del mar (Tanaka y otros., 2019), en Sao Paulo, Brasil se encontró una disminución del 39.2%, el punto más alto siendo el piso 23 (con 73 m de altura) de un edificio en comparación con el nivel superficie.(Castro y otros., 2020) y en la mancha urbana en Shenzhen, China se reportó una disminución del 28.6% (a 70 m de altura en comparación con 10 m que se tomó como superficie) y del 13.7% (a 30 m de altura en comparación con los 10 m de nivel superficie), en un edificio (Li-Li y otros., 2010).

5.4.2 Correlación de variables

En la Gráfica 5 se muestra una matriz de correlaciones mediante la cual se midió cuáles eran las variables que tienen un impacto en la variación de las UFC de hongos aerotransportados detectadas en el universo de muestreos, tomando en cuenta aquellas variables que tuvieron un valor de p menor al valor de alfa de 0.05 (Anexo 2) la humedad relativa, la concentración de bióxido de azufre (SO₂) y la concentración de partículas menores a 10 micras (PM₁₀) fueron las que tienen un impacto estadísticamente significativo.



Gráfica 5 Matriz de correlación de variables de factores abióticos y UFC de hongos aerotransportados

La humedad relativa tiene un impacto positivo sobre las UFC, siendo esto que mientras más aumenta este valor se espera que haya un mayor número de UFC, esto se puede ver reflejado sobre todo en el mes con el mayor promedio en el año de muestreos, ya que después de meses donde no se presentan precipitaciones en el AMM, el fin de semana previo al día de muestreo de Octubre se presentaron intensas lluvias, lo que se ve reflejado en el incremento de UFC, esto puede ser atribuido a que los hongos tienden a incrementar su crecimiento cuando se encuentran en ambientes con altos porcentajes de humedad, mientras que cuando se encuentran en ambientes secos inhiben el crecimiento y la esporulación (Talley, Coley, & Kursar, 2002).

El dióxido de azufre (SO₂) y las partículas menores a 10 micras (PM₁₀) fueron variables con un impacto negativo sobre las UFC, por lo que mientras las concentraciones de estos contaminantes criterio aumenten, se verá una disminución en la carga fúngica del aire, (Mejstrík, 1978) reportó que incrementar las concentraciones de SO₂ tiene un efecto inhibitorio en el crecimiento de algunas especies fúngicas, sin embargo no se ha reportado hasta el momento un efecto inhibitorio sobre el crecimiento o desarrollo de hongos con altas concentraciones de partículas menores a 10 micras, sino que, se ha reportado que algunas esporas fúngicas son parte de estos contaminantes (Alghamdi, y otros, 2014), por la diversidad en la composición de este contaminante en específico no se puede tener con certeza la causa de la inhibición del crecimiento de los hongos.

Esto soporta los resultados obtenidos, que mientras mayor fuera la concentración de estos dos contaminantes se podía ver una afectación directa en las UFC encontradas en los sitios, aplicable solo para el dióxido de azufre (SO₂) y partículas menores o iguales a 10 micras (PM₁₀).

5.5 Géneros de relevancia

Dentro de los hongos cultivables que se identificaron en este estudio, resaltan algunos que tienen implicaciones en la salud de seres humanos así como de plantas y cultivos.

5.5.1 Patógenos oportunistas

A continuación se enlistan los hongos clasificados como patógenos oportunistas que se pudieron identificar durante el estudio, así como cuáles son las implicaciones principales que tienen sobre el ser humano:

- *Aspergillus sp.* las esporas que generan son capaces de causar aspergilosis (tos y dolores torácicos e insuficiencia pulmonar), sin embargo sólo ocurre en personas inmunocomprometidas.
- *Penicillium sp.* no es considerado como tal a menos que se tenga una inmunodepresión y alergia a este género de hongos, lo que puede llegar a causar la muerte.
- *Rhizopus sp.* son capaces de generar infecciones en personas inmunocomprometidas, tal como la mucormicosis que puede llegar a ser fatal.
- *Trichophyton sp.* son causantes de tiña, erupciones cutáneas, entre ellas el pie de atleta, pero no llega a tener impactos mayores en la salud.
- *Mucor sp.* se ha visto que puede llegar a atacar a personas con inmunodeficiencias, en especial a personas que padezcan de diabetes mellitus, ocasionando mucormicosis. (Lehman & Mark Ballow, 2014)

Como se menciona, estos géneros son de riesgo para la salud, sin embargo para poder determinar el verdadero riesgo que imponen para la salud pública es importante conocer las concentraciones de cada uno de estos géneros.

5.5.2 Fitopatógenos

Así mismo se caracterizaron hongos con capacidades fitopatogénicas:

- *Gymnosporangium sp.* es un hongo que infecta arbustos y árboles coníferos, en su mayoría del género *Juniperus* generando malformaciones en los tejidos vegetales.
- *Cladosporium sp.* es un hongo con capacidad de infectar solanáceas, están ampliamente distribuidos en el mundo e incluso se encuentran en la microbiota humana.

Capítulo 6

CONCLUSIONES

Se lograron caracterizar macroscópicamente y microscópicamente once cepas de hongos y obtener una colección de diez hongos levaduriformes en los doce meses de muestreo, de entre los cuales se detectó la presencia de hongos patógenos oportunistas y fitopatogénicos, además de generar una colección de los mismos para su posible uso en otras investigaciones.

Se observa una diferencia entre las UFC de hongos entre las muestras obtenidas a una altura superior a la del nivel del suelo contra aquellas de altura del nivel de superficie, siendo las muestras de nivel superficie las que tienen un promedio mayor de UFC presentes en el aire (24.3% a 60 m de altura y del 23.2% a 146 m de altura) sin embargo, bajo las condiciones de estudio no es significativa estadísticamente.

La humedad relativa (correlación positiva débil) y la concentración de bióxido de azufre (correlación negativa débil) y la presencia de partículas menores a 10 micras (correlación negativa débil) tienen una relación en el cambio en la cantidad de UFC.

La humedad relativa tiene un impacto positivo sobre las UFC, siendo esto que mientras más aumente este valor se espera que haya un mayor número de UFC, esto se puede ver reflejado sobre todo en el mes con el mayor promedio en el año de muestreos, ya que después de meses donde no se presentaban precipitaciones en el AMM, el fin de semana previo al día de muestreo de Octubre se presentaron intensas lluvias, lo que se ve reflejado en el incremento de UFC.

El dióxido de azufre (SO₂) y las partículas menores a 10 micras (PM₁₀) fueron variables con un impacto negativo sobre las UFC, por lo que mientras las concentraciones de estos contaminantes criterio aumenten, se verá una disminución en la carga fúngica del aire.

Se determinó que la superficie foliar de las plantas actúa también como depósito de esporas de hongos, ya que se encontraron los mismos géneros fúngicos que en los muestreos del aire, lo que indica que muy posiblemente las plantas circundantes sean capaces de reducir la movilidad que las esporas fúngicas tienen en el medio ambiente, sin embargo, sería de importancia hacer un estudio con más profundidad en el tema

Se logró identificar y caracterizar los principales hongos microscópicos presentes en muestras de aire y de diversas filosferas, de los cuales se estudió su comportamiento y el impacto de diferentes variables, de entre las cuales se destaca la altura sobre la superficie y los contaminantes criterio, así consiguiendo cumplir con el objetivo principal propuesto para esta investigación.

ANEXOS

Anexo 1. Carta permiso para los muestreos.

San Nicolás de los Garza, Nuevo Leon, México, a 24 de Febrero del 2023

C. Dr. Juan Paura García
Secretario General de la UANL
Presente.

Estimado Dr. Paura García:

Sirva el presente para enviarle un cordial saludo y así mismo solicitar su autorización para realizar una serie de muestreos en la azotea de la Torre de Rectoría de la UANL, esto con el fin de recolectar muestras de aire para la tesis de maestría titulada “Efecto de los gradientes altitudinales y las condiciones atmosféricas sobre la carga fúngica del aire y de las filosferas del Area Metropolitana de Monterrey”, la cual se desarrolla dentro del Posgrado de Microbiología Aplicada impartido en la Facultad de Ciencias Químicas de ésta Universidad.

Los muestreos se realizarán una vez por mes durante un periodo de un año, se estima que dentro de la primera semana de cada mes a partir de Marzo del presente año inicien los muestreos en caso de ser concedido el permiso. Dichos muestreos tendrán una duración de aproximadamente 20 min y el equipo que se utilizará para realizarlos es pequeño y completamente autónomo, por lo que no necesita ninguna toma de corriente ni es de manejo complicado.

La toma de muestras las realizará el alumno Héctor Iván Duéñez Garza bajo el siguiente calendario, respetando asuetos y recesos académico-administrativos estipulados en el calendario oficial de la UANL.:

Día	Mes	Año	Semana
Lunes 6	Marzo	2023	5 al 11 de marzo
Lunes 17	Abril	2023	16 al 22 de abril
Lunes 8	Mayo	2023	7 al 13 de mayo
Lunes 5	Junio	2023	4 al 10 de junio
Lunes 3	Julio	2023	2 al 8 de Julio
Lunes 7	Agosto	2023	6 al 12 de agosto
Lunes 4	Septiembre	2023	3 al 9 de septiembre
Lunes 2	Octubre	2023	1 al 7 de octubre
Lunes 6	Noviembre	2023	5 al 11 de noviembre
Lunes 4	Diciembre	2023	3 al 9 de diciembre
Lunes 15	Enero	2024	14 al 20 de enero
Lunes 12	Febrero	2024	11 al 17 de febrero

Sin más por el momento y agradeciendo la atención que se sirva brindar a la presente, quedamos de usted.

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, a 24 de Febrero del 2023

ATENTAMENTE

L.B.G. Héctor Iván Duñez Garza
No. matrícula 1677278

Dr. Ulrico Javier López Chuken
Director de tesis

Dra. Evangelina Ramírez Lara
Codirectora de tesis

Anexo 2. Valores de p y matriz de correlaciones de Pearson

valores-p (Pearson):

Variables	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Bióxido de azufre (SO ₂)	Bióxido de nitrógeno	Monóxido de carbono	Ozono (O ₃)	Partículas menores a	Partículas menores a	UFC
Temperatura	0	0.730	0.432	0.867	0.060	0.018	0.372	0.326	0.415
Humedad re	0.730	0	0.127	0.116	0.028	0.530	0.382	0.835	0.019
Bióxido de a:	0.432	0.127	0	0.115	0.855	0.772	0.071	0.987	0.020
Bióxido de ni	0.867	0.116	0.115	0	0.875	0.023	0.002	0.516	0.939
Monóxido de	0.060	0.028	0.855	0.875	0	0.836	0.157	0.374	0.913
Ozono (O ₃)	0.018	0.530	0.772	0.023	0.836	0	0.033	0.000	0.556
Partículas me	0.372	0.382	0.071	0.002	0.157	0.033	0	<0.0001	0.050
Partículas me	0.326	0.835	0.987	0.516	0.374	0.000	<0.0001	0	0.894
UFC	0.415	0.019	0.020	0.939	0.913	0.556	0.050	0.894	0

Matriz de correlaciones (Pearson):

Variables	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Bióxido de azufre (SO ₂)	Bióxido de nitrógeno	Monóxido de carbono	Ozono (O ₃)	Partículas menores a	Partículas menores a	UFC
Temperatura	1	-0.051	0.116	-0.025	-0.274	0.339	0.132	0.145	-0.121
Humedad re	-0.051	1	-0.223	-0.230	-0.318	0.093	-0.129	0.031	0.339
Bióxido de a:	0.116	-0.223	1	0.231	0.027	-0.043	0.263	-0.002	-0.336
Bióxido de ni	-0.025	-0.230	0.231	1	0.023	-0.327	0.435	0.096	0.011
Monóxido de	-0.274	-0.318	0.027	0.023	1	0.031	0.207	0.131	-0.016
Ozono (O ₃)	0.339	0.093	-0.043	-0.327	0.031	1	0.308	0.521	-0.087
Partículas me	0.132	-0.129	0.263	0.435	0.207	0.308	1	0.749	-0.285
Partículas me	0.145	0.031	-0.002	0.096	0.131	0.521	0.749	1	-0.020
UFC	-0.121	0.339	-0.336	0.011	-0.016	-0.087	-0.285	-0.020	1

Los valores en negrita son diferentes de 0 con un nivel de significación alfa=0,05

Anexo 3. Datos estadísticos

Altura	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Bióxido de azufre (SO ₂)	Bióxido de nitrógeno (NO ₂)	Monóxido de carbono (CO)	Ozono (O ₃)	Partículas menores a 10 micras (PM ₁₀)	Partículas menores a 2.5 micras (PM _{2.5})	UFC 60 m
60 m	29.7	46.7	3.53	20	1.47	36	101.72	46.76	60
60 m	23.5	65.1	4.52	19.6	1.5	28	70.88	13.19	68
60 m	28.1	66.5	5.1	22.3	1.06	49	85.61	41.97	96
60 m	35.7	65.1	6.82	25.3	1.05	37	78.37		42
60 m	35.7	55.5	2.38	17.8	1.19	55		33.03	20
60 m	33.1	60	4.26	17	1.22	66	83.53	26	27
60 m	35.6	21.5	5.32	21.1	1.26	32	40.11	12.46	11
60 m	35.1	57	3.16	18.7	0.9		42.71	12.49	177
60 m	28.6	54	4.75	25.4	1.72	44	74.43	29.38	16
60 m	27.4	49	3.84	57.6	2.23	12	107.52	28.14	93
60 m	33.1	60	4.43	20.6	1.52	14	88.29	16.71	1
60 m	19.7	41	3.42	18.9	1.71	20	54.8	5.54	1
Superficie	29.3	48	3.53	20	1.47	36	101.72	46.76	71
Superficie	22	64	4.52	19.6	1.5	28	70.88	13.19	78
Superficie	25.9	72.3	5.1	22.3	1.06	49	85.61	41.97	134
Superficie	31.6	47	6.82	25.3	1.05	37	78.37		68
Superficie	38.2	50.5	2.38	17.8	1.19	55		33.03	5
Superficie	35.7	53	4.26	17	1.22	66	83.53	26	23
Superficie	31.9	57	5.32	21.1	1.26	32	40.11	12.46	20
Superficie	33	57	3.16	18.7	0.9		42.71	12.49	217
Superficie	26.2	58	4.75	25.4	1.72	44	74.43	29.38	17
Superficie	22.6	52	3.84	57.6	2.23	12	107.52	28.14	141
Superficie	35.7	53	4.43	20.6	1.52	14	88.29	16.71	1
Superficie	19	37	3.42	18.9	1.71	20	54.8	5.54	1
146 m	27	51	3.59	16.1	2.23	57	119.63	63.86	38
146 m	22	62	3.31	5.8	3.52	32	47.68	18.74	108
146 m	24.4	68.7	3.06	19.1	0.96	57	80.52	45.19	107
146 m	26.4	63	3.22	20.1	1.25	49	91.72		33
146 m	29.6	67.3	2.62	15.9	1.21	12	33.63	11.25	48
146 m	27.1	66.5	4.2	9	1.33	78	63.27	22.04	28
146 m	27.3	73	2.97	19.4	0.77	28	73.37	19.6	10
146 m	24.5	76	2.1	13.8	0.64	17	22.3	6.22	171
146 m	24.2	62	3.01	21.5	1.08	35	63.99	18.51	6
146 m	18.3	60	3.02	19.8	0.68	8	49.14		95
146 m	27.1	66.5	6.22	23.6	0.77	6	82.16	21.08	2
146 m	17.6	42	5.32	20.7	1.89	15	60.57	10.85	6
Superficie	28.1	51	3.59	16.1	2.23	57	119.63	63.86	44
Superficie	21.8	63.7	3.31	5.8	3.52	32	47.68	18.74	162
Superficie	25.1	76	3.06	19.1	0.96	57	80.52	45.19	94
Superficie	28.7	59.5	3.22	20.1	1.25	49	91.72		72
Superficie	31.4	65.5	2.62	15.9	1.21	12	33.63	11.25	29
Superficie	30.1	64	4.2	9	1.33	78	63.27	22.04	28
Superficie	29	65.5	2.97	19.4	0.77	28	73.37	19.6	17
Superficie	26.1	70	2.1	13.8	0.64	17	22.3	6.22	262
Superficie	22.5	60	3.01	21.5	1.08	35	63.99	18.51	9
Superficie	19.5	62	3.02	19.8	0.68	8	49.14		110
Superficie	30.1	64	6.22	23.6	0.77	6	82.16	21.08	1
Superficie	16.2	45	5.32	20.7	1.89	15	60.57	10.85	1

REFERENCIAS

- Alghamdi, M., Shamy, M., Redal , M., Khoder, M., Awad , A., & Elserougy, S. (2014). Microorganisms associated particulate matter: a preliminary study. *Sci Total Env.*
- Bowers, R. M., Clements, N., Emerson, J. B., Wiedinmyer, C., Hannigan, M. P., & Fierer, N. (2013). Seasonal variability in bacterial and fungal diversity of the near-surface atmosphere. *Environmental Science & Technology*, 12097–12106.
- Bowers, R. M., Sullivan, A., Costello, E. k., Collet Jr., J. L., Knight, R., & Fierer, N. (2011). Sources of Bacteria in Outdoor Air across Cities in the Midwestern United States. *Applied and Environmental Microbiology*, 6350–6356.
- Brenner, B., Heinze, S., Szewzyk, R., Wolter, E., & Werr, C. E. (2017). Environmental health relevance of airborne microorganisms in ambient and indoor air. *Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz*, 618-624.
- Brighigna, L., Gori, A., Gonnelli, S., & Favilli, F. (2000). The influence of air pollution on the phyllosphere microflora composition of Tillandsia leaves (Bromeliaceae). *Revista de biología tropical*, 511–517.
- Copenhagen Consensus Center. (2015). *Copenhagen Consensus Center*. Obtenido de Copenhagen Consensus Center: <https://copenhagenconsensus.com/publication/mexico-perspective-air-pollution>
- • Castro E Silva, D. M., Marcusso, R. M. N., Barbosa, C. G. G., Gonçalves, F. L. T., & Cardoso, M. R. A. (2020). Air pollution and its impact on the concentration of airborne fungi in the megacity of São Paulo, Brazil. *Heliyon*.
- De La Rosa, M. C., Mosso, M. A., & Ullán, C. (2002). El aire: hábitat y medio de transmisión de microorganismos. *Observatorio Medioambiental*, 375-402.
- DeLeon-Rodriguez, N., Lathem, T. L., Rodriguez-R, L. M., Barazesh, J. M., Anderson, B. E., Beyersdorf, A. J., . . . Konstantinidis, K. T. (2013). Microbiome of the upper troposphere: Species composition and prevalence, effects of tropical storms, and atmospheric implications. *PNAS*, 2575-2580.
- Drautz-Moses, D. I., Luhung, I., Gusareva, E. S., Kee, C., Gaultier, N. E., Premkrishnan, B. N., . . . Schuster, S. C. (2022). Vertical stratification of the air microbiome in the lower troposphere. *PNAS*, 1-8.

- Espinell-Ingroff, A., Montero, D., & Martin-Manzuelos, D. (2004). Long-Term Preservation of Fungal Isolates in Commercially Prepared Cryogenic Microbank Vials. *Journal of Clinical Microbiology*, 1257–1259.
- Fayad, R. K., Al-Thani, R. F., Al-Naemi, F. A., & Abu-Dieyeh, M. H. (2020). Diversity, Concentration and Dynamics of Culturable Fungal Bioaerosols at Doha, Qatar. *International journal of environmental research and public health*.
- Fernandez-Gracia, M. D., Elizondo-Zertuche, M., Orué, N., Treviño-Rangel, R., Rodríguez-Sánchez, I. P., Zapata-Morín, P. A., . . . Robledo-Leal, E. (2023). Culturable Airborne Fungi in Downtown Monterrey (Mexico) and Their Correlation with Air Pollution over a 12-Month Period. *Atmosphere*.
- Fröhlich-Nowoisky, J., Pickersgill, D. A., Després, V. R., & Pöschl, U. (2009). High diversity of fungi in air particulate matter. *PNAS*, 12814–12819.
- Fröhlich-Nowoisky, J., Pickersgill, D., Després, V., & Pöschl, U. (2009). High diversity of fungi in air particulate matter. *Proceedings of the National Academy of Sciences*.
- Fröhlich-Nowoisky, J., Ruzene Nespoli, C., Pickersgill, D., Galand, P. E., Müller-Germann, I., Nunes, T., . . . Després, V. R. (2014). Diversity and seasonal dynamics of airborne archaea. *Biogeosciences*, 6067–6079.
- Gamboa Quezada, R. (2020). Estudio de la calidad microbiológica del aire en diferentes municipios del área metropolitana de Monterrey. *Estudio de la calidad microbiológica del aire en diferentes municipios del área metropolitana de Monterrey*. Monterrey, Nuevo León, México.
- Grady, K. L., Sorensen, J. W., Stopnisek, N., Guittar, J., & Shade, A. (2019). Assembly and seasonality of core phyllosphere microbiota on perennial biofuel crops. *nature Communications*, 1-10.
- Grant Smith, E. (1990). *Sampling and identifying allergenic pollens and molds*. San Antonio, Texas: Blewstone Press.
- Herrera, T., & Ulloa, M. (1998). *El reino de los hongos*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO). (3 de Junio de 2016). *Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO)*. Obtenido de Base de datos global sobre la polución del aire en ambientes urbanos vía OMS: <https://imco.org.mx/base-de-datos-global-urbana-de-la-contaminacion-del-aire-2016-via-oms/>

- Jain , A., Jain, R., & Jain , S. (2020). Isolation of Microorganisms from Air. En A. Jain, R. Jain, & S. Jain, *Basic Techniques in Biochemistry, Microbiology and Molecular Biology* (págs. 119-120). New York: Springer Protocols.
- Lacey, M., & West, J. (2006). *The Air Spora: A Manual for Catching and Identifying Airborne Biological Particles*. Springer.
- Leál-Iga, J. (2019). Efectos físicos de la contaminación atmosférica percibidos de manera inconsciente por la ciudadanía, en el área metropolitana de la ciudad de Monterrey, Nuevo León, México. *Salud Pública*.
- Lehman, H., & Mark Ballow. (2014). Chapter 44 - Immune Compromise Due to Metabolic Disorders: Malnutrition, Obesity, Stress, and Inborn Errors of Metabolism. En K. E. Sullivan, *Stiehm's Immune Deficiencies* (págs. 823-834). Academic Press.
- Li Li, Chao Lei, Zhi-Gang Liu. (2010). Investigation of airborne fungi at different altitudes in Shenzhen University. *Natural Science*. Vol.2 No.5.
- Martínez Muñoz, A., & Valdez Cavazos, A. (2016). Calidad del aire en el área metropolitana de Monterrey. *CienciaUANL*.
- Mayora, F. (01 de Septiembre de 2019). Contaminación del aire en Monterrey, Nuevo León: interpretación del monitoreo ambiental 2005-2018. *Revista de Investigación*.
- Mejstřík V. (1978). Der Einfluss von Schwefeldioxyd auf das Wachstum einiger Pilzarten [Influence of sulphur dioxide on the growth of some fungal species (author's transl)]. *Zentralblatt für Bakteriologie, Parasitenkunde, Infektionskrankheiten und Hygiene*. Zweite naturwissenschaftliche Abteilung: Mikrobiologie der Landwirtschaft der Technologie und des Umweltschutzes, 133(5), 464–467.
- Nava Palacios, A., García S., H., & Sánchez-Yañez, J. M. (Abril de 2006). *Microorganismos en la atmósfera de la ciudad de Monterrey, N.L. México*. Obtenido de Research Gate: https://www.researchgate.net/publication/340334875_Microorganismos_en_la_atmosfera_de_la_ciudad_de_Monterrey_NL_Mexico_Microorganisms_in_the_atmosphere_of_Monterrey_City_N_L_Mexico
- Nitiu, D. S., & Mallo, A. C. (2011). Variaciones en la estacionalidad de polen y esporas fúngicas en la atmósfera de la ciudad de La Plata (Argentina). *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 297-304.
- Niu, M., Zhou, F., Yang , Y., Sun , Y., Zhu , T., & Shen , F. (2020). Abundance and composition of airborne archaea during springtime mixed dust and haze periods in Beijing, China. *The Science of the total environment*.

- Pandiyan, K., Kushwaha, P., Lal Kashyap, P., Yuvraj Bagul, S., Karthikeyan, N., & Saxena, A. (2021). 12 - Phyllosphere microbiome: modern prospectus and application. En M. Kumar Solanki, P. Lal Kashyap, R. Ansari, & B. Kumari, *Microbiomes and Plant Health* (págs. 345-366). Chennai: Academic Press.
- Procop, G. W., Church, D. L., Hall, G. S., & Janda, W. M. (2020). *Koneman's Color Atlas and Textbook of Diagnostic Microbiology*. Burlington: Jones & Bartlett Learning.
- Rojas Bracho, L., & Garibay Bravo, V. (2003). Las partículas suspendidas, aeropartículas o aerosoles: ¿hacen daño a la salud?; ¿podemos hacer. *Gaceta Ecológica*, 29-44.
- Román Pedroza, J. F. (Abril de 2013). Asociación entre la exposición a PM10 y PM2.5 y síntomas respiratorios en una población escolar del municipio de Ecatepec, Estado de México. *ARTÍCULO PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN SALUD PÚBLICA CON ÁREA DE CONCENTRACIÓN EN EPIDEMIOLOGIA*. Tlalpan, Estado de México, México: Instituto Nacional de Salud Pública.
- Ruiz-Gil, T., Acuña, J. J., Fujiyoshi, S., Tanaka, D., Noda, J., Maruyama, F., & Jorquera, M. A. (2020). Airborne bacterial communities of outdoor environments and their associated influencing factors. *Environment International*, 106156.
- Schlesinger, W. H. (2020). The Atmosphere. *Biogeochemistry*, 51–97.
- SIMA. (02 de Octubre de 2023). *Aire Nuevo León*. Obtenido de Sistema Integral de Monitoreo Ambiental: <http://aire.nl.gob.mx/>
- Smith, D., & Onions, A. (1995). *The preservation and maintenance of living fungi*. Bakeham Lane: International Mycological Institute.
- Talley, S., Coley, P., & Kursar, T. (2002). The effects of weather on fungal abundance and richness among 25 communities in the Intermountain West. *BMC Ecology*.
- Tanaka, D., Sato, K., Goto, M., Fujisyoshi, S., Muruyama, F., Takato, S., . . . Nakamura, S. (05 de Febrero de 2019). Airborne Microbial Communities at High-Altitude and Suburban Sites in Toyama, Japan Suggest a New Perspective for Bioprospecting. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 1-11.
- Verástegui Rubio, D. F., Contreras López, J. M., Narváez Torres, Y., Garza Villarreal, D. Y., Cantú Cárdenas, M. E., Zárata, X., . . . Ramírez Lara, E. (Julio - Septiembre de 2015). Identificación de microorganismos presentes en la atmósfera baja de una zona industrial del área metropolitana de Monterrey. *Química Hoy*, 18-21.

- Wang, C. C., Prather, K. A., Sznitman, J., Jimenez, J. L., Lakdawala, S. S., Tufekci, Z., & Marr, L. C. (2021). Airborne transmission of respiratory viruses. *Science*, 1-12.
- Wei, X., Lyu, S., Yu, Y., Wang, Z., Liu, H., Pan, D., & Chen, J. (2017). Phylloremediation of Air Pollutants: Exploiting the Potential of Plant Leaves and Leaf-Associated Microbes. *frontiers in Plant Science*.
- Woo, C., An, C., Xu, S. y otros. (2018). Taxonomic diversity of fungi deposited from the atmosphere. ISME.
- Zhao, H., Huang, L., Xiao, C., Liu, J., Wei, J., & Gao, X. (2010). Influence of culture media and environmental factors on mycelial growth and conidial production of *Diplocarpon mali*. *Letters in Applied Microbiology*, 639-644.