



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN
PARA EL DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
UNIDAD DURANGO**

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN GESTIÓN AMBIENTAL

**EFFECTO DE LA CONTAMINACION ATMOSFÉRICA SOBRE LA SÍNTESIS
DE COMPUESTOS FENÓLICOS DE FLORA URBANA EN LA CIUDAD DE
DURANGO, MÉXICO**

Tesis

Que para obtener el grado de Maestro en Ciencias presenta:

L.B Cynthia Patricia Sánchez Aguilar

DIRECTORES:

Dr. José Antonio Ávila Reyes

Dra. Norma Almaraz Abarca

Victoria de Durango, Dgo., Junio 2017





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-14-BIS

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Durango, Dgo. siendo las 13:40 horas del día 31 del mes de mayo del 2017 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del: CIIDIR-IPN Unidad Durango para examinar la tesis titulada:

Efecto de la contaminación atmosférica sobre la síntesis de compuestos fenólicos de flora urbana en la ciudad de Durango, México

Presentada por el alumno:

SÁNCHEZ**AGUILAR****CYNTHIA PATRICIA**

Apellido paterno

Apellido materno

Nombre(s)

Con registro:

B	1	5	1	0	0	9
---	---	---	---	---	---	---

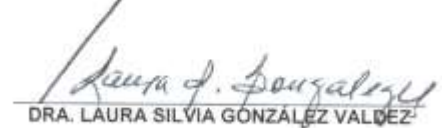
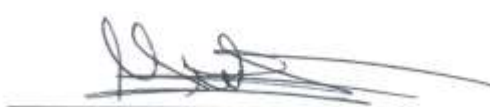
aspirante de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN GESTIÓN AMBIENTAL

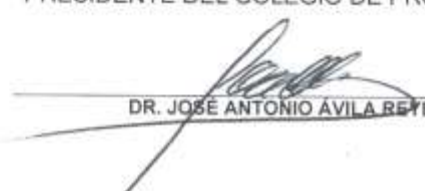
Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis


DR. JOSÉ ANTONIO ÁVILA REYES
DRA. NORMA ALMARAZ ABARCA
DRA. LAURA SILVIA GONZÁLEZ VALDEZ
M. EN C. NÉSTOR NARANJO JIMÉNEZ
DR. RENE TORRES RICARIO

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES


DR. JOSÉ ANTONIO ÁVILA REYES



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-13-BIS

*ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS
Y DESIGNACIÓN DE DIRECTORES DE TESIS*

México, D.F. a 31 de mayo del 2017

El Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de **CIIDIR-IPN Durango** en su sesión **extraordinaria** No. **3** celebrada el día **04** del mes de **mayo** conoció la solicitud presentada por el(la) alumno(a):

SÁNCHEZ**AGUILAR****CYNTHIA PATRICIA**

Apellido paterno

Apellido materno

Nombre (s)

Con registro:

B	1	5	1	0	0	9
---	---	---	---	---	---	---

Aspirante de: Maestría en Ciencias en Gestión Ambiental

1.- Se designa al aspirante el tema de tesis titulado:
Efecto de la contaminación atmosférica sobre la síntesis de compuestos fenólicos de flora urbana en la ciudad de Durango, México

De manera general el tema abarcará los siguientes aspectos:

2.- Se designan como Directores de Tesis a los Profesores:
Dr. José Antonio Ávila Reyes y Dra. Norma Almaraz Abarca

3.- El trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesis será elaborado por el alumno en:
El CIIDIR-IPN Unidad Durango

que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.

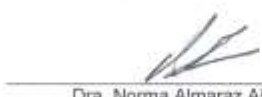
4.- El interesado deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente hasta la aceptación de la tesis por la Comisión Revisora correspondiente:

Directores de Tesis


Dr. José Antonio Ávila Reyes

Aspirante


Lic. en Biol. Cynthia Patricia
Sánchez Aguilar


Dra. Norma Almaraz Abarca

Presidente del Colegio


Dr. José Antonio Ávila Reyes



CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACIÓN PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
CIIDIR
UNIDAD DURANGO
IPN



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de Durango, Dgo., el día **31** del mes de **mayo** del año **2017**, la que suscribe **Cynthia Patricia Sánchez Aguilar** alumna del Programa de **Maestría en Ciencias en Gestión Ambiental**, con número de registro **B151009**, adscrita al **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Durango. CIIDIR-IPN Unidad Durango**, manifiesta que es la autora intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del **Dr. José Antonio Ávila Reyes** y de la **Dra. Norma Almaraz Abarca** y cede los derechos del trabajo titulado **“Efecto de la contaminación atmosférica sobre la síntesis de compuestos fenólicos de flora urbana en la ciudad de Durango, México”**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso de la autora y/o directores del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones biocyn@hotmail.com, jaavre@yahoo.com.mx y noralab@yahoo.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

CYNTHIA PATRICIA SANCHEZ AGUILAR

El presente trabajo se realizó en las instalaciones del Laboratorio de Biotecnología del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR) Unidad Durango del Instituto Politécnico Nacional, bajo la dirección del Dr. José Antonio Ávila Reyes y a la Dra. Norma Almaraz Abarca.

AGRADECIMIENTOS

Al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional del Instituto Politécnico Nacional Unidad Durango (CIIDIR IPN Unidad Durango).

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por brindarme el apoyo económico que me sirvió de sustento durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

A mis padres y hermanos por su apoyo en mi desarrollo personal y profesional por alentarme a seguir adelante y jamás darme por vencida, por enseñarme a luchar contra las adversidades y hacerme una mejor persona, Gracias.

Tío Angelito(†), donde quiera que estés, Gracias por protegerme.

A mi Director de Tesis, Dr. José Antonio Ávila Reyes por siempre creer en mi, por no dejarme caer, por alentarme a seguir desarrollándome personal y profesionalmente.

A la Dra Norma Almaraz Abarca, Gracias, estaré eternamente agradecida por sus grandes enseñanzas, con nada pagaré el tiempo que invirtió en mi desarrollo profesional.

A mi asesora, Dra. Laura Silvia González Valdez, Gracias por tu tiempo y sus consejos.

M.C. Néstor Naranjo Jiménez, Gracias por apoyarme, y por los consejos, que me ayudaran a tomar mejores decisiones.

Dr. Rene Torres, M.C. Amanda Delgado, Gracias por todas sus enseñanzas.

Ana Isabel Chaídez, Gracias por la paciencia, las enseñanzas pero sobre todo por brindarme tu amistad

Hugo Manuel García Monreal, Gracias por tus enseñanzas y apoyo.

March Guti y Hugh Monreal, Rene Torres, Ana Chaídez, Amanda Delgado, gracias por su amistad, por hacer que mi estancia en el laboratorio de biotecnología de las mejores de mi vida.

A mis profesores que contribuyeron a mi formación académica, Gracias.

Marisol Saenz Torres, Gracias por todo, especialmente por tu amistad y apoyo en los momentos más difíciles.

A mis compañeros y amigos por su amistad por hacer de esta experiencia algo inolvidable.

DEDICATORIA

A mi hijo, amor e inspiración en mi vida, Gracias por compartir el tiempo de un mismo reloj...

INDICE

RESUMEN	iii
ABSTRACT	v
INTRODUCCIÓN	1
I. ANTECEDENTES	2
1.1 Contaminación aire-atmosfera	2
1.2 Fuentes de contaminación	3
1.3 Tipos de contaminantes	4
1.4 Efectos de la contaminación sobre los seres vivos	5
1.5 Efectos de la contaminación sobre las plantas.....	5
1.6 Metabolismo de las plantas	6
1.6.1 Metabolismo primario de las plantas	6
1.6.2 Metabolismo secundario de las plantas	7
1.6.3 Productos del metabolismo secundario de las plantas.....	7
1.6.4 Clasificación de los metabolitos secundarios de las plantas	8
1.7 Compuestos fenólicos	8
1.8 Efectos de la contaminación sobre la composición fenólica de plantas	11
1.9 Condición actual de la contaminación atmosférica en la ciudad de Durango..	12
1.9.1 Calidad del aire para el municipio de Durango	14
II. JUSTIFICACIÓN	15
III. OBJETIVO.....	15
IV. HIPÓTESIS.....	15
V. MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
5.1 Área de estudio	16
5.2 Localidades muestreadas.....	16
5.3 Toma de muestras	18
5.4 Preparación de extractos.....	19
5.5 Determinación de fenoles totales	19
5.6 Determinación de taninos condensados	19
5.7 Determinación de los perfiles fenólicos	20
5.8 Análisis de datos	21

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
6.1 Fenoles totales	23
6.1.1 Correlación entre contenidos de fenoles totales y niveles de contaminantes del aire	31
6.2 Taninos condensados	40
6.3 Composición fenólica	56
6.3.1 Pruebas de correlación entre unidades arbitrarias de concentración de los compuestos fenólicos y niveles de contaminantes del aire	80
VII. CONCLUSIONES	84
VIII. RECOMENDACIONES Y SUGERENCIAS	86
IX. BIBLIOGRAFÍA	87
X. ANEXOS	96

GLOSARIO

Antropogénica: Actividades llevadas a cabo por el hombre.

Contaminación atmosférica: Condición atmosférica en la que ciertas sustancias alcanzan concentraciones elevadas sobre su nivel ambiental normal, como para producir efectos nocivos sobre la vida.

Compuestos fenólicos: Compuestos químicos que se sintetizan en el metabolismo secundario, se caracterizan por tener un anillo aromático con un radical hidroxilo en su estructura.

Especie: Se define como el grupo de organismos capaces de entrecruzarse y producir y dejar descendencia fértil.

Flavonoides: Grupo diverso de metabolitos secundarios de las plantas que se caracteriza por su estructura base de número de carbonos C_6 C_3 C_6 .

Foliar: De las hojas de las plantas o relativo a ellas.

Perennifolio: Término para designar a los árboles o arbustos que poseen hojas vivas a lo largo de todo el año.

Metabolismo secundario: Es un mecanismo sensible de respuesta de las plantas a las condiciones ambientales, cuyo resultado es la síntesis de una amplia gama de sustancias llamados metabolitos secundario.

Metabolito: Cualquier molécula utilizada o producida durante el metabolismo.

Rutas biosintéticas: En bioquímica, es la sucesión de reacciones químicas que conducen de un sustrato inicial a uno final.

Respuesta fisiológica: Es la reacción que se produce en los organismos antes diferentes estímulos de estrés.

Síntesis: Es el proceso por el cual se producen compuestos químicos a partir de compuestos simples o precursores químicos.

LISTA DE ACRÓNIMOS

$\lambda_{\max}$: Absorbancia máxima.

°C: grados centígrados.

CEPAL: Comisión Económica para América Latina y el Caribe.

CIIDIR: Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional.

CO: Monóxido de carbono.

COVs: Compuestos orgánicos volátiles.

CBTIS 130: Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicios 130.

EEQ: Equivalentes de epicatequina.

EAG: Equivalentes de ácido gálico.

HCL: Ácido clorhídrico.

HPLC-DAD: Cromatografía líquida de alta resolución con detector de arreglo de diodos.

ICA: índice de Calidad del Aire.

ITD: Instituto Tecnológico de Durango.

NO_x : Óxido de nitrógeno.

O₃: Ozono.

ROG: Compuestos orgánicos reactivos.

PM 10 y 2.5: Partículas menores a 10 micrómetros y partículas menores a 2.5 micrómetros.

PPM: Partes por millón.

PROFEPA: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente.

SIMCA: Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire del Estado de Durango.

SO₂: Dióxido de azufre.

SRNyMA: Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente.

TR: Tiempo de retención.

UA: Unidades de absorbancia.

UV: Ultravioleta.

µg/m³ : Microgramos por metro cubico.

RELACIÓN DE FIGURAS

Figura 1. Estructura química del fenol.	9
Figura 2. Estructura básica de los flavonoides.	10
Figura 3. Ubicación del área de estudio	17
Figura 4. Resultados de un análisis de agrupamiento basado en las concentraciones de fenoles totales en cuatro épocas del año, de ocho especies de plantas que crecen en cinco sitios diferentes de la ciudad de Durango, México... 24	24
Figura 5. Resultados de un análisis de agrupamiento basado en las concentraciones de fenoles totales que ocho especies de plantas que crecen en cinco sitios diferentes de la ciudad de Durango, México acumularon en cuatro épocas del año.	25
Figura 6. Resultados de un análisis de agrupamiento basado en las concentraciones de taninos en cuatro épocas del año, de ocho especies de plantas que crecen en cinco sitios diferentes de la ciudad de Durango, México.	42
Figura 7. Resultados de un análisis de agrupamiento basado en las concentraciones de taninos que ocho especies de plantas que crecen en cinco sitios diferentes de la ciudad de Durango, México acumularon en cuatro épocas del año.	43

RELACIÓN DE TABLAS

Tabla 1. Estructura química básica de algunos tipos de flavonoides.....	11
Tabla 2. Fuentes de emisiones de la ciudad de Durango, en 2013 (mg/año).....	13
Tabla 3. Especies colectadas en cinco sitios de la ciudad de Durango, México...	18
Tabla 4. Datos de calidad del aire en la cd de Durango proporcionados por la SRNyMA Secretaria de Recursos Naturales y Medio Ambiente).	22
Tabla 5. Concentración de fenoles totales (mg EAG/g ES) de tres especies de plantas en cuatro épocas de año del sitio PROFEPA (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente).	26
Tabla 6. Concentración de fenoles totales (mg EAG/g ES) de tres especies de plantas en cuatro épocas de año del sitio SRNyMA (Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente).	27
Tabla 7. Concentración de fenoles totales (mg EAG/g ES) de tres especies de plantas en cuatro épocas de año del sitio ITD (Instituto Tecnológico de Durango).	27
Tabla 8. Concentración de fenoles totales (mg EAG/g ES) de tres especies de plantas en cuatro épocas de año del sitio CBTIS 130 (Centro de Bachillerato Tecnológico 130).	28
Tabla 9. Concentración de fenoles totales (mg EAG/g ES) de tres especies de plantas en cuatro épocas de año del sitio CIIDIR (Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional).	28
Tabla 9.1 Concentración de fenoles totales (mg EAG/g ES) de <i>Ligustrum japonicum</i> colectado en cuatro sitios en cuatro épocas del año.	29
Tabla 9.2. Concentración de fenoles totales (mg EAG/g ES) de <i>Cupressus macrocarpa</i> colectada en cuatro sitios en cuatro épocas del año.	30
Tabla 9.3. Concentración de fenoles totales (mg EAG/g ES) de <i>Schinus terebinthifolius</i> colectado en tres sitios en cuatro épocas del año.	30
Tabla 9.4 Concentración de fenoles totales (mg EAG/g ES) de <i>Ligustrum lucidum</i> colectado en dos sitios en cuatro épocas del año.	31

Tabla 9.5. Correlación entre la variación de los niveles de partículas PM ₁₀ y la concentración de fenoles totales de tres especies encontradas en el sitio PROFEPA (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente).	32
Tabla 9.6. Correlación entre la variación de los niveles de partículas O ₃ y la concentración de fenoles totales de tres especies encontradas en el sitio ITD (Instituto Tecnológico de Durango).	32
Tabla 9.7. Correlación entre la variación de los niveles de partículas NO _x y la concentración de fenoles totales de tres especies encontradas en el sitio ITD (Instituto Tecnológico de Durango).	33
Tabla 9.8. Correlación entre la variación de los niveles de partículas SO ₂ y la concentración de fenoles totales de tres especies encontradas en el sitio ITD (Instituto Tecnológico de Durango).	33
Tabla 9.9. Correlación entre la variación de los niveles de partículas CO y la concentración de fenoles totales de tres especies encontradas en el sitio ITD (Instituto Tecnológico de Durango).	33
Tabla 9.10. Correlación entre la variación de los niveles de partículas PM ₁₀ y la concentración de fenoles totales de tres especies encontradas en el sitio ITD (Instituto Tecnológico de Durango).	33
Tabla 9.11. Correlación entre la variación de los niveles de partículas SO ₂ y la concentración de fenoles totales de tres especies encontradas en el sitio SRNyMA (Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente).....	34
Tabla 9.12. Correlación entre la variación de los niveles de partículas PM 10 y la concentración de fenoles totales de tres especies encontradas en el sitio SRNyMA (Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente).....	35
Tabla 9.13. Correlación entre la variación de los niveles de partículas PM 2.5 y la concentración de fenoles totales de tres especies encontradas en el sitio SRNyMA (Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente).....	35
Tabla 9.14. Correlación entre la variación de los niveles de partículas PM 10 y la concentración de fenoles totales de tres especies encontradas en el sitio CBTIS 130 Centro de Bachillerato Industrial y de Servicios 130).	35

Tabla 9.15. Correlación entre la variación de los niveles de partículas O ₃ y la concentración de fenoles totales de tres especies encontradas en el sitio CIIDIR (Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional). .	36
Tabla 9.16. Correlación entre la variación de los niveles de partículas NO _x y la concentración de fenoles totales de tres especies encontradas en el sitio CIIDIR (Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional). .	37
Tabla 9.17. Correlación entre la variación de los niveles de partículas SO ₂ y la concentración de fenoles totales de tres especies encontradas en el sitio CIIDIR (Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional). .	37
Tabla 9.18. Correlación entre la variación de los niveles de partículas CO y la concentración de fenoles totales de tres especies encontradas en el sitio CIIDIR (Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional). .	37
Tabla 9.19. Correlación entre la variación de los niveles de partículas PM 10 y la concentración de fenoles totales de tres especies encontradas en el sitio CIIDIR (Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional). .	38
Tabla 9.20. Correlación entre la variación de los niveles de partículas PM 2.5 y la concentración de fenoles totales de tres especies encontradas en el sitio CIIDIR (Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional). .	38
Tabla 10. Concentración de taninos condensados (mg EEC/g ES) de tres especies de plantas en cuatro épocas de año del sitio PROFEPA (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente).	44
Tabla 11. Concentración de taninos condensados (mg EEC/g ES) de tres especies de plantas en cuatro épocas de año del sitio SRNyMA (Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente).	44
Tabla 12. Concentración de taninos condensados (mg EEC/g ES) de tres especies de plantas en cuatro épocas de año del sitio ITD (Instituto Tecnológico de Durango).	45
Tabla 13. Concentración de taninos condensados (mg EEC/g ES) de tres especies de plantas en cuatro épocas de año del sitio CBTIS 130 (Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicios 130).	45

Tabla 14. Concentración de taninos condensados (mg EEC/g ES) de tres especies de plantas en cuatro épocas de año del sitio CIIDIR (Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional).....	46
Tabla 14.1. Concentración de taninos (mg EEC/g ES) de <i>Ligustrum japonicum</i> colectado en cuatro sitios (los sitios son de acuerdo a la Figura 3) en cuatro épocas del año.	46
Tabla 14.2. Concentración de taninos (mg EEC/g ES) de <i>Cupressus macrocarpa</i> colectado en cuatro sitios (los sitios son de acuerdo a la Figura 3) en cuatro épocas del año.	47
Tabla 14.3. Concentración de taninos (mg EEC/g ES) de <i>Schinus terebinthifolius</i> colectado en tres sitios (los sitios son de acuerdo a la Figura 3) en cuatro épocas del año.	48
Tabla 14.4. Concentración de taninos (mg EEC/g ES) de <i>Ligustrum lucidum</i> colectado en dos sitios (los sitios son de acuerdo a la Figura 3) en cuatro épocas del año.	48
Tabla 14.5. Correlación entre la variación de los niveles de partículas PM ₁₀ y la concentración de taninos condensados de tres especies encontradas en el sitio PROFEPA (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente).	49
Tabla 14.6. Correlación entre la variación de los niveles de partículas O ₃ y la concentración de taninos condensados de tres especies encontradas en el sitio ITD (Instituto Tecnológico de Durango).	50
Tabla 14.7. Correlación entre la variación de los niveles de partículas NO _x y la concentración de taninos condensados de tres especies encontradas en el sitio ITD (Instituto Tecnológico de Durango).	50
Tabla 14.8. Correlación entre la variación de los niveles de partículas SO ₂ y la concentración de taninos condensados de tres especies encontradas en el sitio ITD (Instituto Tecnológico de Durango).	50
Tabla 14.9. Correlación entre la variación de los niveles de partículas CO y la concentración de taninos condensados de tres especies encontradas en el sitio ITD (Instituto Tecnológico de Durango).	51

Tabla 14.10. Correlación entre la variación de los niveles de partículas PM ₁₀ y la concentración de taninos condensados de tres especies encontradas en el sitio ITD (Instituto Tecnológico de Durango).	51
Tabla 14.11. Correlación entre la variación de los niveles de partículas SO ₂ y la concentración de taninos condensados de cinco especies encontradas en el sitio SRNyMA (Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente).	52
Tabla 14.12. Correlación entre la variación de los niveles de partículas PM 10 y la concentración de taninos condensados de cinco especies encontradas en el sitio SRNyMA (Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente).	52
Tabla 14.13. Correlación entre la variación de los niveles de partículas PM 2.5 y la concentración de taninos condensados de cinco especies encontradas en el sitio SRNyMA (Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente).	52
Tabla 14.14. Correlación entre la variación de los niveles de partículas PM 10 y la concentración taninos condensados totales de tres especies encontradas en el sitio CBTIS 130 (Centro de Bachillerato Industrial y de Servicios 130).	53
Tabla 14.15. Correlación entre la variación de los niveles de partículas O ₃ y la concentración de taninos condensados de tres especies encontradas en el sitio CIIDIR (Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional).	53
Tabla 14.16. Correlación entre la variación de los niveles de partículas NO _x y la concentración de taninos condensados de tres especies encontradas en el sitio CIIDIR (Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional).	54
Tabla 14.17. Correlación entre la variación de los niveles de partículas SO ₂ y la concentración de taninos condensados de tres especies encontradas en el sitio CIIDIR (Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional).	54
Tabla 14.18. Correlación entre la variación de los niveles de partículas CO y la concentración de taninos condensados de tres especies encontradas en el sitio CIIDIR (Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional).	54

Tabla 14.19. Correlación entre la variación de los niveles de partículas PM 10 y la concentración de taninos condensados de tres especies encontradas en el sitio CIIDIR (Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional).....	55
Tabla 14.20. Correlación entre la variación de los niveles de partículas PM 2.5 y la concentración de taninos condensados de tres especies encontradas en el sitio CIIDIR (Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional).....	55
Tabla 15. Compuestos fenólicos encontrados en las hojas de 7 especies urbanas de plantas de la ciudad de Durango, México.....	59
Tabla 16. Concentración individual en unidades arbitrarias de los compuestos fenólicos resueltos.....	79
Tabla 17. Correlación entre las unidades arbitrarias de concentración de compuestos y variación de los niveles de partículas PM 10 de tres especies encontradas en el sitio PROFEPA (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente).....	81
Tabla 17.1. Correlación entre la variación de los niveles de partículas SO ₂ y las unidades arbitrarias de concentración de compuestos de tres especies encontradas en el sitio SRNyMA (Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente).....	82
Tabla 17.2. Correlación entre la variación de los niveles de partículas de PM10 y las unidades arbitrarias de concentración de compuestos de tres especies encontradas en el sitio SRNyMA (Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente).....	82
Tabla 17.3. Correlación entre la variación de los niveles de partículas PM 2.5 y las unidades arbitrarias de concentración de compuestos de tres especies encontradas en el sitio SRNyMA (Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente).....	82
Tabla 17.4. Correlación entre la variación de los niveles de partículas PM 2.5 y las unidades arbitrarias de concentración de compuestos de tres especies encontradas en el sitio CBTIS 130 (Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicios 130).	83

RESUMEN

La alteración de las condiciones del medio ambiente, debido al aumento en las concentraciones de gases y partículas suspendidas en el aire, es un problema ambiental que va en aumento debido a la industrialización y el incremento del tráfico vehicular. Esta problemática está obligando al hombre a buscar parámetros para conocer los niveles en que se da la vida. El metabolismo secundario es un mecanismo sensible de respuesta de las plantas a las condiciones ambientales cambiantes y es por medio del cual se sintetiza una gran variedad de compuestos químicos, entre ellos, los llamados compuestos fenólicos o polifenoles. En este trabajo se determinó la variación en la composición fenólica foliar de ocho especies de plantas (*Ligustrum japonicum*, *Ligustrum lucidum*, *Ligustrum ovalifolium*, *Cupressus macrocarpa*, *Schinus terebinthifolius*, *Pinus greggii*, *Ficus retusa* y *Casuarina equisetifolia*) y su relación con los distintos parámetros de calidad del aire de cinco sitios de la ciudad de Durango, México, con diferentes niveles de contaminantes atmosféricos en diferentes periodos estacionales (primavera, verano, otoño e invierno). La composición fenólica foliar de cada especie se realizó por medio de cromatografía líquida de alta presión con detector de arreglo de diodos (HPLC-DAD) y por métodos espectrofotométricos (cuantificación de fenoles totales y taninos condensados). Los resultados indicaron que las concentraciones de fenoles totales y taninos condensados fueron características para cada época del año. *Schinus terebinthifolius* colectada en agosto en el sitio CIIDIR acumuló la cantidad más alta de fenoles totales (65.69 mg EAG /g ES) y *Ficus retusa*, colectada en febrero en el sitio ITD acumuló la cantidad más alta de taninos condensados (27.95 mg EEC/g ES). Los análisis de HPLC-DAD revelaron un total de 56 compuestos. De entre ellos, 28 fueron ácidos fenólicos y 28 flavonoides. La correlación más alta se encontró entre la concentración de fenoles totales de *Ficus retusa* y SO₂ (-0.9982 con una significancia de 0.03801) y entre la concentración de taninos condensados de *Ligustrum lucidum* y O₃ (0.97739 con una significancia de 0.022613). Los resultados sugieren que las diferentes especies analizadas responden de manera diferente a las condiciones de contaminación del aire, sin una tendencia generalizada y que los niveles de fenoles totales de *F. retusa* y los de

taninos condensados de *L. lucidum* pueden proponerse como indicadores de calidad del aire relacionada a los niveles de SO₂ y O₃, respectivamente. Sin embargo, se requiere realizar más estudios controlando las exposiciones de esas especies a los contaminantes mencionados.

ABSTRACT

The alteration of the environmental conditions, caused by the increase of gas concentration and particles suspended in the air, is an environmental problem that is increasing, due to industrialization and the excess of vehicular traffic. This problem is forcing man to seek for parameters to know the limits of life. Secondary metabolism is a sensitive response mechanism of plants to respond to variable environmental conditions. This metabolism produces a high variety of chemical compounds, among them, those called phenolic compounds or polyphenols. In the current study, the variation of foliar phenolic composition of eight plant species (*Ligustrum japonicum*, *Ligustrum lucidum*, *Ligustrum ovalifolium*, *Cupressus macrocarpa*, *Schinus terebinthifolius*, *Pinus greggii*, *Ficus retusa* and *Casuarina equisetifolia*) and its relation with different levels of air pollutants of five locations of Durango city, Mexico, which had different air quality level, at four different seasons of the year (winter, spring, summer and fall) was determined. The foliar phenolic composition of each species was carried out by high performance liquid chromatography with photo-diode array detection (HPLC-DAD) and spectrophotometric methods (total phenolic content and condensed tannins). The results indicated that the concentrations of total phenols and condensed tannins were characteristic for each season of the year. *Schinus terebinthifolius* collected in August at location CIIDIR accumulated the highest amount of total phenols (65.69 mg EAG/g ES) and *Ficus retusa* collected in February at location ITD accumulated the highest value of condensed tannins (27.95 mg EEC/g ES). The analysis of HPLC-DAD revealed a total of 56 compounds. Among them, 28 were phenolic acids and 28 were flavonoids. The highest correlation was found between the total phenolics concentration of *Ficus retusa* and SO₂ (-0.9982 with a significance of 0.03801) and between the concentration of condensed tannins of *Ligustrum lucidum* and O₃ (0.97739 with a significance of 0.022613). The results suggest that the different plant species analyzed respond in different manner to different air pollutants. No general tendency was found. The results also suggest that the total phenolics levels of *F. retusa* and the condensed tannins levels of *L. lucidum* may

be proposed as indicators of air quality. However, more studies, controlling exposition of these plant species to the mentioned pollutants are needed.

INTRODUCCIÓN

La contaminación es uno de los principales problemas ambientales que surge cuando se produce un desequilibrio que es provocado por la sobreacumulación de sustancias expeditas por diferentes fuentes emisoras, de manera que la naturaleza no puede procesarlas, provocando alteraciones o daños al medio ambiente, los cuales pueden afectar la vida en general.

Las ciudades son lugares en los que, por las altas concentraciones de personas y de vehículos de motor, la calidad del aire suele estar deteriorada. Si bien la ciudad de Durango, no presenta los problemas alarmantes que presentan la ciudad de México, Guadalajara, o Monterrey, en los que se requieren aplicar contingencias ambientales para contrarrestar los efectos de las emisiones vehiculares a la calidad del aire, su parque vehicular sí ha crecido en los últimos años y se requiere buscar indicadores que contribuyan a monitorear la calidad del aire.

Las plantas poseen mecanismos químicos sensibles que las ayudan a adaptarse a condiciones ambientales de estrés. Entre los compuestos químicos cuya acumulación se ve afectada por contaminantes del aire están los compuestos fenólicos.

En la ciudad de Durango existen diversas especies de plantas sembradas en áreas verdes, camellones, parques, y jardines que podrían servir como indicadores de la calidad del aire.

En este trabajo se determinó la composición fenólica de ocho especies de plantas de cinco sitios de la zona urbana de la ciudad de Durango y se estimó su correlación con los niveles de contaminantes atmosféricos, con el propósito de evaluar el potencial de esas plantas como indicadores de la calidad del aire.

Las ocho especies analizadas se seleccionaron por su amplia distribución en la ciudad de Durango, por su abundancia, y por su condición de especies perenes, mientras los cinco sitios se seleccionaron por albergar estaciones meteorológicas y representar lugares con diferente nivel de tráfico vehicular.

I. ANTECEDENTES

1.1 Contaminación aire-atmosfera

En cualquier sistema ambiental, para que se mantenga un equilibrio, cualquier forma o cantidad de materia o energía que entre en él, deberá salir tarde o temprano, de lo contrario, la materia o energía que se encuentran en exceso se acumularan y darán origen a algún tipo de contaminación (Albert, 2004). En las ciudades, donde se encuentran las mayores concentraciones humanas, se presentan los más altos niveles de impacto ambiental (Fenger, 1999). Uno de los componentes ambientales que se ve afectado en gran medida por las actividades humanas de tipo urbano es el aire.

La contaminación del aire o contaminación atmosférica es definida por Martínez y Rodríguez de Torres (2000) como cualquier condición atmosférica en la que ciertas sustancias alcanzan concentraciones elevadas sobre su nivel ambiental normal, como para producir efectos nocivos sobre la vida.

La contaminación atmosférica es un problema que ha existido desde la aparición del hombre en la tierra. Con el descubrimiento del fuego, y tal vez en menor escala y sin la conciencia de que estaban generando algún daño ambiental, los humanos generaron alteraciones en la composición del aire. Spengler y Sexton (1983) reportaron que “hollín hallado en el techo de cuevas prehistóricas provee amplia evidencia de altos niveles de contaminación que estaban asociados a una inadecuada ventilación de las fogatas”. La contaminación del aire fue incrementando con el paso del tiempo. Durante la Revolución Industrial, época en la que se reemplazó el trabajo manual por maquinaria que funcionaba a base de vapor, se incrementó el uso de combustibles como el carbón mineral y el petróleo, generando con ello grandes cantidades de emisiones perjudiciales al medio ambiente (SEMARNAT, 2015). En el Plan Nacional de Desarrollo de México, se señala que además del proceso de industrialización, las emisiones vehiculares asociadas a la quema de combustibles, y la deforestación, en los últimos 50 años han producido cambios significativos en el sistema climático (SEMARNAT, 2017).

1.2 Fuentes de contaminación

Existen fuentes naturales de contaminación como son las actividades volcánicas, incendios forestales, huracanes, y tornados, entre otros, que emiten gases y partículas que quedan en suspensión. Cuando esas partículas en suspensión se mezclan con otros elementos presentes en la atmósfera pueden formar compuestos que por lo general suelen ser depurados por la propia atmósfera pero cuando sobrepasan ciertos límites es imposible para la atmósfera procesarlos y entonces se genera algún tipo de daño ambiental.

La contaminación antropogénica es la que excede la capacidad de la atmósfera para autorregularse. Entre ese tipo de contaminación se encuentra la contaminación atmosférica causada por el tráfico vehicular y la industria, que liberan gases y partículas sólidas que son capaces de mantenerse en suspensión en la atmósfera, con valores superiores a los normales, por ejemplo, el aumento de los niveles de dióxido de carbono. El aumento de los niveles de este compuesto se debe a la combustión del carbón y del petróleo, lo que provoca un calentamiento del aire, produciendo un desequilibrio químico, que genera cantidades altas de monóxido de carbono en el ambiente (Gutiérrez, 2014).

El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2014) clasifica las fuentes de contaminantes en cuatro grupos: puntuales, móviles, de área, y naturales. Las fuentes puntuales son puntos fijos o estacionarios de emisiones contaminantes, como las plantas de energía, industrias químicas, refinerías de petróleo, y fábricas, entre otras. Las fuentes móviles incluyen a las diversas formas de transporte tales como los vehículos automotores, aviones, trenes, y barcos, entre otros. Las de área comprende fuentes pequeñas, numerosas y dispersas, que en conjunto pueden afectar la calidad del aire en una región, por ejemplo: el uso de madera para cocinar o calentar la casa, las imprentas, las estaciones de servicio, y las tintorerías, entre otras. Las fuentes naturales se refieren a los fenómenos naturales, tales como la actividad volcánica e incendios provocados por fenómenos naturales. La vida animal y vegetal puede jugar un papel importante en el problema de la contaminación del aire; sin embargo, en algunos casos una actividad humana

es la causa fundamental, como en la concentración establecida de un número alto de animales de crianza.

1.3 Tipos de contaminantes

La atmosfera está compuesta por diferentes sustancias que pueden estar en forma de gas, gota líquida, o como partículas sólidas suspendidas, que al combinarse entre sí pueden modificar sus características naturales y formar elementos nocivos a la vida, por ejemplo el humo, polvo, gases, cenizas, y residuos, entre otros. Con base en su origen, las sustancias presentes en el aire se pueden clasificar en contaminantes primarios y secundarios.

Los contaminantes primarios emergen directamente de las fuentes de emisión y los secundarios son el producto de reacciones químicas o fotoquímicas entre los contaminantes primarios y los componentes normales de la atmósfera (Martínez y Rodríguez de Torres, 2000; Vallejo *et al.*, 2003), los cuales han sido ya extensivamente estudiadas a nivel mundial (Finlayson-Pitts y Pitts, 1986; Seinfeld, 1988; Bravo *et al.*, 1991).

Entre los contaminantes aéreos más importantes en las ciudades se señalan las partículas totales en suspensión, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, dióxido de azufre, hidrocarburos, y ozono superficial (Puliafito *et al.*, 2000).

La contaminación fotoquímica por oxidantes, mejor conocida como “smog”, es realmente la mezcla de diversos compuestos gaseosos y aerosoles, de entre los que destacan el ozono (O_3), el dióxido de nitrógeno (NO_2) y los nitratos (NO_3). El ozono se ha considerado el representante típico de los oxidantes debido a su mayor porcentaje en la atmosfera urbana y facilidad de medición, aunque también se tienen otros oxidantes de interés como son el nitrato de peroxiacetilo (PAN) y el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), estos compuestos son producidos fotoquímicamente por la acción de la energía ultravioleta del sol sobre las emisiones de los óxidos de nitrógeno ($NO_x = NO_2 + NO$) resultantes de procesos de combustión a alta temperatura así como de los compuestos orgánicos reactivos (ROG) emitidos a la atmósfera por uso de solventes y como productos de combustión (Bravo *et al.*, 1991).

1.4 Efectos de la contaminación sobre los seres vivos

La contaminación atmosférica afecta a millones de personas de todo el mundo, especialmente a aquellas que viven en los grandes núcleos urbanos y en áreas industrializadas con denso tráfico vehicular. Este tipo de contaminación se ha convertido en una amenaza para la calidad de la vida, de la población humana, animal, y vegetal.

Los efectos producidos por la contaminación atmosférica dependen principalmente del tipo de contaminantes, de la concentración de los mismos, del tiempo de exposición de los diferentes organismos, de las fluctuaciones temporales, así como de la sensibilidad de los receptores que absorben dichos contaminantes.

1.5 Efectos de la contaminación sobre las plantas

Debido a su naturaleza sésil y a los largos tiempos que esa naturaleza sésil las obliga a estar expuestas, las plantas muestran una alta sensibilidad a la mayor parte de los contaminantes del aire, lo que les ocasiona daños significativos a concentraciones mucho más bajas que otros organismos (Iriti y Faoro, 2009). En estas condiciones las estructuras vegetativas como las hojas, las ramas o la corteza cumplen un papel importante como receptores y filtradores de las partículas suspendidas contaminantes (CEPAL, 1991; Dalmasso *et al.*, 1997; Alcalá *et al.*, 2011). Existen dos aspectos de este fenómeno, uno referido al impacto aerodinámico de la vegetación sobre la transferencia de contaminantes, ligado a las modificaciones que la vegetación produce sobre la velocidad del viento, y otro relacionado con la captación de los contaminantes por las hojas de los vegetales (Dalmasso *et al.*, 1997). La eficiencia de este último proceso depende del tipo de contaminante y de la estructura de la vegetación. En particular dependerá de la densidad y altura de los árboles, de la diversidad de especies, y de la orientación y espesor de los árboles y arbustos, respecto a los vientos predominantes.

El poder de retención de polvo atmosférico varía con la especie y las características morfo-anatómicas de la hoja (superficie expuesta y grado de pilosidad). Este efecto de retención por la vegetación es bien conocido en especies europeas, así *Abies*

pinsapo (abeto rojo) retiene 32 Tn/ha en condiciones de bosque denso, mientras que *Populus sp.* (álamo) sólo 1 Tn/ha (CEPAL, 1991).

Los efectos producidos en la vegetación por la contaminación atmosférica debido a la acción de gases como sulfatos (SO_x), nitratos (NO_x), ozono (O_3), y partículas suspendidas totales (PST) se pueden manifestar en la disminución y alteración de las funciones metabólicas como la fotosíntesis, respiración y por lo tanto en el desarrollo y crecimiento (Iriti y Faoro, 2009; Alcalá *et al.*, 2011; Rezanejad, 2012).

Sin embargo, las plantas presentan mecanismos de defensa o de respuesta ante las condiciones ambientales, éstos se llevan a través de mecanismos fisiológicos y metabólicos.

1.6 Metabolismo de las plantas

El metabolismo es un conjunto de procesos y reacciones químicas, anabólicas y catabólicas, mediante los cuales los organismos obtienen la energía y los nutrientes para vivir y reproducirse, que está presente en todos los organismos y es llamado metabolismo primario. Las plantas, además de un metabolismo primario que lleva a cabo funciones primordiales para su sobrevivencia, presentan un metabolismo secundario, cuyo resultado es la síntesis de una amplia gama de sustancias llamadas metabolitos secundarios (Almaraz-Abarca *et al.*, 2006a; DeBerardinis y Thompson, 2012), cuya síntesis se ve afectada por las condiciones ambientales (Oksman-Caldentey e Inzé, 2004).

1.6.1 Metabolismo primario de las plantas

El metabolismo primario de las plantas incluye las reacciones químicas que a partir de carbono, nitrógeno, hidrogeno, oxígeno y otros elementos producen los requerimientos fundamentales para su desarrollo, obteniendo productos que se les conoce como metabolitos primarios. A partir de algunos metabolitos primarios se derivan los metabolitos secundarios (Bourgau *et al.*, 2001; Ávalos y Pérez-Urría, 2009; Monreal-García, 2015).

1.6.2 Metabolismo secundario de las plantas

El término de “metabolismo secundario” fue introducido en 1891 por Kossel (citado por Baas, 1989): *“Mientras que los metabolitos primarios están presentes en cada célula de la planta que es capaz de reproducirse, los metabolitos secundarios están presentes solo accidentalmente y no son imprescindibles para la vida.”* Lo anterior se pensaba en el tiempo en que Kossel describió a los metabolitos secundarios. Sin embargo, actualmente la apreciación de esos compuestos ha cambiado y se valoran desde otra perspectiva.

En la actualidad se les sigue llamando metabolitos secundarios aunque se ha demostrado la participación de estos compuestos en diferentes relaciones ecológicas y procesos fisiológicos importantes para la sobrevivencia de la planta (Kutchan, 2001; Hadacek, 2002; Taiz y Zeiger, 1991; Rivera-Rodríguez *et al.*, 2011). Autores como Sosa (2003), proponen denominar a los compuestos primarios sustancias “fisiológicamente eficaces”, frente a los compuestos secundarios que serían ecológicamente eficaces”.

1.6.3 Productos del metabolismo secundario de las plantas

La síntesis de los diferentes productos del metabolismo secundario tiende a ser especie-específica (Medina-Medrano *et al.*, 2015). Los metabolitos secundarios tienen funciones ecológicas específicas, entre ellas, como repelentes de ataques de algunos depredadores, proporcionándoles a las plantas sabores amargos, haciéndolas indigestas o venenosas, actuando entonces como pesticidas naturales. Algunos grupos de metabolitos secundarios son pigmentos que proporcionan color a flores y frutos, jugando un papel esencial en la reproducción, ya que atraen a insectos polinizadores o a animales que al utilizar los frutos como fuente de alimento, contribuyendo a la dispersión de semillas (Ávalos y Pérez-Urría, 2009; Iriti y Faoro, 2009).

1.6.4 Clasificación de los metabolitos secundarios de las plantas

Los metabolitos secundarios de las plantas pertenecen a tres grandes grupos, según sus rutas biosintéticas (Croteau *et al.*, 2000; Bourgaud *et al.*, 2001; Taiz y Zeiger, 1991): los derivados terpénicos, los compuestos fenólicos, y los compuestos que contienen nitrógeno.

Los terpenos o terpenoides son un conjunto de más de 30 000 compuestos que se sintetizan por la vía del ácido mevalónico y tienen como unidad estructural fundamental al isopentenil, un derivado del isopreno (Taiz y Zeiger, 1991). Los terpenos se encuentran en un gran número de plantas y presentan una amplia gama de actividades biológicas (Almaraz-Abarca *et al.*, 2006a). A este grupo pertenecen los aceites esenciales y las saponinas (Kennedy y Wightman, 2011; Mazid *et al.*, 2011; Vitela *et al.*, 2011).

Los compuestos fenólicos o polifenoles se caracterizan por poseer al menos un anillo aromático con un radical hidroxilo en su estructura, se sintetizan por la ruta del ácido shikímico y por la vía del ácido malónico; actualmente se reconoce para ellos una gran diversidad estructural (Taiz y Zeiger, 1991). Este tipo de compuestos también posee un amplio espectro de actividades biológicas, principalmente como antioxidantes (Almaraz-Abarca *et al.*, 2007; Dixon, 2001).

Los compuestos secundarios que contienen nitrógeno en su estructura representan un grupo químicamente muy heterogéneo. Entre ellos se encuentran los alcaloides, de los cuales se conocen más de 12 000, los glucosinolatos, y los aminoácidos no proteicos. Muchos de los compuestos de este grupo tienen uso medicinal (Almaraz-Abarca *et al.*, 2006a).

1.7 Compuestos fenólicos

Como se mencionó anteriormente, los compuestos fenólicos o polifenoles son compuestos que se caracterizan por tener en su estructura un anillo aromático (fenol) con uno o más grupos hidroxilo. En la Figura 1 se muestra la estructura química del fenol, aunque existen más de 8000 variantes (Huang *et al.*, 2009)

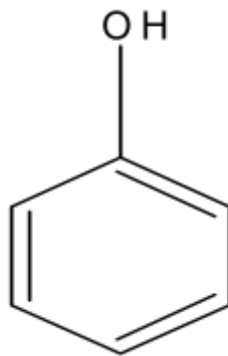


Figura 1. Estructura química del fenol.

Los grupos de polifenoles se clasifican según su estructura básica de átomos de carbono en: C_6 (fenoles simples, benzoquinonas), C_6C_1 (ácido fenólicos), C_6C_2 (ácidos fenilacéticos y acetofenonas), C_6C_3 (ácidos hidroxicinámicos, fenilpropenos, cumarinas, isocumarinas y cromonas), C_6C_4 (naftoquinonas), $C_6C_1C_6$ (xantonas), $C_6C_2C_6$ (estilbenos y antroquinonas), $C_6C_3C_6$ (flavonoides, isoflavonoides) ($C_6C_3C_6$)_{2,3} (bi y triflavonoides), (C_6C_3)₂ (lignanós, neolignanós), (C_6C_3)_n (lignanós), (C_6)_n, (catecolaminas), y ($C_6C_3C_6$)_n (flavolanos o taninos condensados) (Cheynier *et al.*, 2013).

Los compuestos fenólicos son un grupo muy diverso y ampliamente distribuido en el reino vegetal. Entre ellos, los flavonoides se distinguen por su distribución prácticamente universal en el reino vegetal, por su alta diversidad de actividades biológicas, su gran variabilidad química, por su relativa estabilidad respecto a los factores ambientales, su tendencia de síntesis y acumulación especie-específica, y su relativa facilidad de análisis. Todas esas características de los flavonoides los han hecho útiles en estudios quimiotaxonómicos (Markham, 1982; Harborne y Turner, 1984; Campos, 1997; Almaraz-Abarca *et al.*, 2004; Almaraz-Abarca *et al.*, 2006b; Almaraz-Abarca *et al.*, 2008).

Se han descrito más de 10 000 compuestos flavonoides que se encuentran distribuidos en los diferentes tejidos de diversas especies de plantas (Cheynier *et*

al., 2013). Los diferentes flavonoides presentan variaciones en los grupos sustituyentes que se encuentran en su estructura básica de 15 carbonos, la cual tiene dos anillos aromáticos unidos por un puente de tres carbonos ($C_6-C_3-C_6$) (Pandey y Rizvi, 2009). La estructura básica de los flavonoides y la numeración de sus átomos de carbono se presentan en la Figura 2.

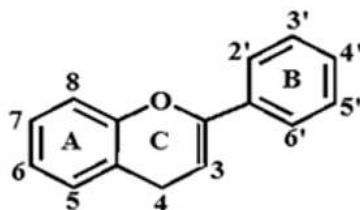
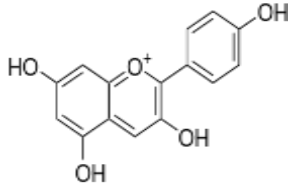
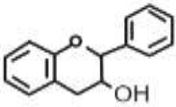
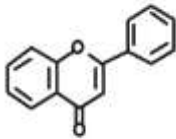
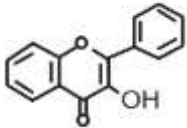


Figura 2. Estructura básica de los flavonoides.

Según Escamilla *et al.* (2009), los flavonoides se pueden clasificar de acuerdo al grado de oxidación del puente de tres carbonos (anillo C). Las antocianinas, formas glicosadas de las antocianidinas, presentan un grupo $-OH$ unido en posición 3 y un doble enlace entre carbonos 2 y 3 del anillo C. Los flavanos presentan un grupo $-OH$ en posición 3 del anillo C, el cual carece de dobles enlaces. Las flavonas poseen un grupo carbonilo en posición 4 del anillo C, un doble enlace entre el carbono 2 y 3 del mismo anillo, y carecen de un grupo hidroxilo en la posición 3. Los flavonoles son semejantes a las flavonas, con la diferencia de que presentan un grupo $-OH$ en posición 3 del anillo C. Ejemplos de estos tipos de flavonoides se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Estructura química básica de algunos tipos de flavonoides.

Tipo de compuestos	Ejemplo	Estructura
Antocianidinas	Pelargonidina	
Flavanos	Catequina	
Flavonas	Diosmetina	
Flavonoles	Quercetina	

1.8 Efectos de la contaminación sobre la composición fenólica de plantas

La composición de los compuestos fenólicos de una especie de planta se puede ver afectada por las condiciones ambientales de crecimiento (Del Valle *et al.*, 2015). Los cambios provocados por condiciones ambientales variables generalmente son cuantitativos no cualitativos, es decir que afectan únicamente la concentración de los compuestos, no su presencia en un tejido vegetal determinado (Almaraz-Abarca *et al.*, 2013a).

Diferentes condiciones de estrés también pueden afectar la composición cuantitativa de los perfiles fenólicos de las plantas (Sharma *et al.*, 2012). Sin embargo, el nivel en que el metabolismo secundario de la síntesis y acumulación de compuestos fenólicos se ve afectado por algún tipo de estrés ambiental puede ser diferente para especies diferentes de plantas (Tajvar *et al.*, 2011).

La síntesis de los compuestos fenólicos, particularmente de flavonoides, es dependiente del tipo de tejido, así el perfil encontrado en hojas es diferente al encontrado en raíz o polen. El polen de algunas plantas como *Spartium junceum* L., *Lagerstroemia indica* L., and *Thuja orientalis* L. tienen potencial como posibles indicadores de contaminación atmosférica por SO₂, NO₂, CO, hidrocarburos, y partículas suspendidas en el aire, ya que se encontraron niveles más altos de flavonoides en el polen de plantas de esas especies creciendo en sitios altamente contaminados que en sitios poco contaminados (Rezanejad, 2012). La importancia de los perfiles de flavonoides sobre los perfiles de otros compuestos, como las proteínas, como potenciales indicadores de contaminación atmosférica fue revelada por Rezanejad (2009), quien comparó ambos tipos de compuestos en polen de *Thuja orientalis*, encontrando que, contrario a la síntesis de proteínas, la síntesis de flavonoides fue muy susceptible a los niveles de contaminación.

Los efectos de contaminantes del aire también han sido evaluados en los tejidos foliares. El reporte de Rezende y Furlan (2009) revelaron que las concentraciones de antocianinas y particularmente de taninos foliares de *Psidium juajava* cv. Paluma expuestas a ozono estuvieron positivamente relacionadas a concentraciones elevadas de ese gas. Esa relación quedó confirmada en condiciones de campo por Sandre *et al.*, (2014).

1.9 Condición actual de la contaminación atmosférica en la ciudad de Durango

El 65% de la población en el estado de Durango se encuentra distribuida en las principales cabeceras como Gómez Palacio, Lerdo y el municipio de Durango, donde sus principales actividades económicas son servicios inmobiliarios y de alquiler de bienes muebles e intangibles, industria alimentaria, agricultura, cría y explotación de animales, aprovechamiento forestal, pesca, caza y construcción

(SEECO, 2015). Esas actividades demandan altos consumos de combustibles y por lo tanto afectan considerablemente la calidad del aire.

La calidad del aire se refiere a la concentración de diferentes contaminantes presentes en la atmosfera en un periodo y lugar determinados que pudieran llegar a tener efectos adversos sobre la población.

El Sub-sistema del inventario nacional de emisiones a la atmosfera de México (SINEA) menciona que para el estado de Durango, las fuentes fijas donde se incluye a la industria, aportan el 79% de dióxido de azufre (SO_2), las fuentes móviles (tráfico vehicular) aportan el 89% de monóxido de carbono (CO), 68% de los óxidos de nitrógeno (NO_x) y 58% de los compuestos orgánicos volátiles (COVs) y las fuentes de área (pequeños negocios y asentamientos humanos) emiten el 94% de la partículas menores a 10 micrómetros (PM_{10}) el 88% de las partículas menores a 2.5 micrómetros $\text{PM}_{2.5}$ y 93% del amoniaco (NH_3), todos ellos llamados contaminantes criterio por tener un impacto nocivo al medio ambiente y a la salud. En la Tabla 2, se presentan las emisiones equivalentes a mg/año en el estado de Durango correspondientes al año 2013 donde se emitieron un total de 66,620 mg/año de PM_{10} , 18,839 mg/año de $\text{PM}_{2.5}$, 14,302 mg/año de SO_2 , 650,299 mg/año de CO, 139,875 mg/año de NO_x , 255,950 mg/año de COVs y 30,689 mg/año de NH_3 (SRNyMA, 2014 y 2016).

Tabla 2. Fuentes de emisiones de la ciudad de Durango, en 2013 (mg/año).

Fuentes	PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$	SO_2	CO	NO_x	COVs	NH_3
Fijas	2909	2123	11357	3958	8249	2850	167
Área	47368	16522	1367	64667	19973	45202	28659
Móviles	275	164	1578	581673	58808	67626	1864
Naturales	16068	NA	NA	NA	52844	140272	NA
Total	66620	18809	14302	650298	139874	255950	30690

1.9.1 Calidad del aire para el municipio de Durango

El SIMCA, (Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire del Estado de Durango) menciona que para el municipio de Durango se toma en cuenta como valor de referencia al Índice de Calidad del Aire (ICA) para medir los niveles de contaminación atmosférica, este índice se calcula en base a las horas promedio de contaminantes como ozono (O_3), dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2), monóxido de carbono (CO), material particulado menor a 10 micrómetros (PM10) y partículas menores a 2.5 micrómetros (PM 2.5), que se encuentran en el aire y que son registrados por cada estación de monitoreo ubicada dentro del municipio de Durango. De esa manera se conocen los niveles de contaminación predominantes y el nivel de riesgo que representan. Esa información sirve para elaborar recomendaciones para la protección de sus habitantes.

En el año 2005 se presentó el inventario de emisiones para el municipio de Durango (SRNyMA, 2014), en el cual se compararon las emisiones de contaminantes criterio, presentando los siguientes resultados, un total de 1885 tn/año de material particulado menor a 10 micrómetros (PM10), 916 tn/año de partículas menores a 2.5 micrómetros (PM 2.5), 3915 tn/año de sulfatos (SO_x), 9569 tn/año, 203774 tn/año de monóxido de carbono (CO), 25333 tn/año de compuestos orgánicos volátiles (COVs) y de amoníaco (NH_3) 2206 tn/año (SRNyMA, 2016).

II. JUSTIFICACIÓN

El incremento poblacional en la ciudad de Durango está provocando la intensificación de las actividades antropogénicas, lo que tienen como consecuencia el aumento de los niveles de contaminación. Esos niveles pueden llegar a concentraciones críticas para la salud humana, de animales, y de la flora urbana, por lo que se hace necesario contar con indicadores que alerten sobre esos niveles. Diferentes características estructurales y químicas de las plantas pueden servir como indicadores de contaminación. Dentro de las características químicas, los perfiles fenólicos han demostrado ser muy sensibles a las condiciones de contaminación del aire. Tomando en cuenta lo anterior, se consideró importante realizar estudios de los efectos de niveles variables de contaminación atmosférica presentes en diferentes regiones de la ciudad de Durango sobre los perfiles fenólicos de las principales (por su abundancia) especies urbanas de plantas para identificar las más sensibles que puedan representar indicadores de contaminación.

III. OBJETIVO

Determinar la respuesta fisiológica, mediante la caracterización de perfiles fenólicos, de ocho especies de la flora urbana de la ciudad de Durango en cinco zonas de concentración variable de contaminación ambiental.

IV. HIPÓTESIS

Dado que los gases producto de los motores de combustión interna alteran la composición normal de la atmosfera, las plantas podrían manifestar alteraciones en su metabolismo, específicamente en la síntesis y acumulación de compuestos fenólicos foliares.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Área de estudio

El área de estudio estuvo constituida por cinco localidades de la zona urbana de la ciudad de Durango, Dgo., ubicadas entre las siguientes coordenadas geográficas: 23° 56` 00`` y 24° 08` 00 de latitud Norte y 104° 46` 00`` y 104° 32` 00`` de longitud oeste. La altitud varió entre 1 100 y 3 200 m. La ciudad de Durango cuenta con una superficie territorial de 10,313.8 hectáreas. Tiene un intervalo de temperatura de 8 a 22°C y uno de precipitación de entre 400 y 1 200 mm. El uso de suelo actual corresponde a: agricultura (11.1%), zona urbana (0.9%) y no aplicable (0.1%) Bosque (59.4%), pastizal (19.6%), matorral (8.4%) y selva (0.1%).

Las zonas urbanas están creciendo sobre suelo del Cuaternario y rocas ígneas del Terciario, en llanura aluvial y meseta con cañadas, sobre áreas originalmente ocupadas por suelos denominados Kastañozem, Calcisol, Leptosol, Cambisol y Phaeozem. Tienen clima semiseco templado y están creciendo sobre terrenos previamente ocupados por áreas agrícolas, pastizales y matorrales (INEGI, 2010).

5.2 Localidades muestreadas

Las localidades muestreadas se seleccionaron tomando en cuenta la ubicación de las estaciones de medición de las condiciones ambientales de la SRNyMA (Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente), que se encuentran instaladas en la PROFEPA (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente), ITD (Instituto Tecnológico de Durango), CBTIS 130 (Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicios 130), CIIDIR (Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional), y en las instalaciones de la misma SRNyMA (Figura 3).

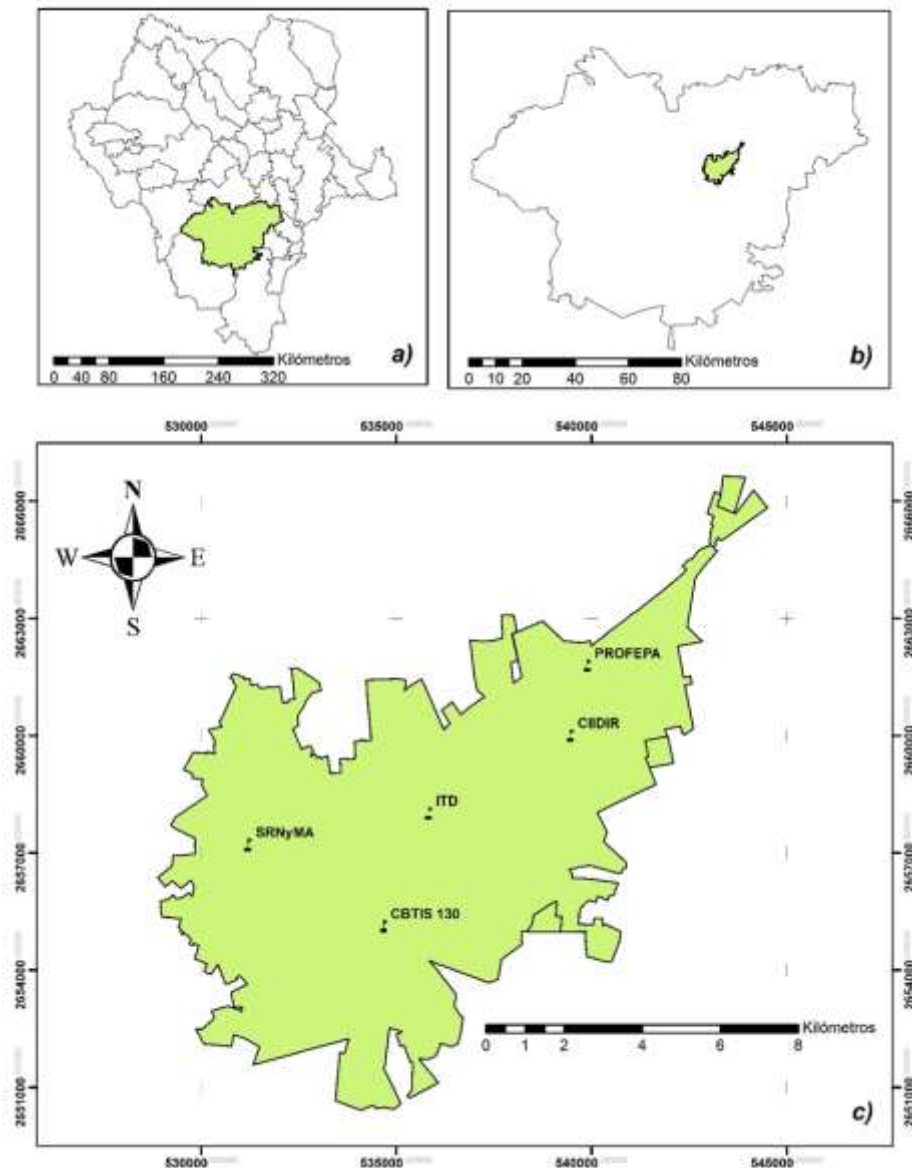


Figura 3. Ubicación del área de estudio. a): municipio de Durango (en verde). b): zona urbana dentro del municipio de Durango (en verde). c): ubicación de las cinco localidades estudiadas dentro de la zona urbana. PROFEPA: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente; CIIDIR: Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional; ITD: Instituto Tecnológico de Durango; SRNyMA: Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente; CBTIS 130: Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicios 130.

5.3 Toma de muestras

En cada uno de las cinco localidades de muestreo se colectó tejido foliar de plantas adultas de un número variable de especies de plantas y de individuos por especie. Las especies colectadas por localidad se describen en la Tabla 3.

Tabla 3. Especies colectadas en cinco sitios de la ciudad de Durango, México.

Nombre común	Nombre científico	Familia	Número de individuos colectados	Sitio
Casuarina o pinabete	<i>Casuarina equisetifolia</i> J.R. Forst. & G. Forst.	Casuarinaceae	1	SRNyMA
Cedro limón	<i>Cupressus macrocarpa</i> Hartw. ex Gordon	Cupressaceae	4	PROFEPA SRNyMA ITD CIIDIR
Laurel de la india	<i>Ficus retusa</i> L.	Moraceae	1	ITD
Pirul chino	<i>Schinus terebinthifolius</i> Raddi.	Anacardiaceae	4	PROFEPA CBTIS 130 CIIDIR
Pino prieto	<i>Pinus greggii</i> Engelm. ex Parl.	Pinaceae	1	SRNyMA
Trueno jamaquino	<i>Ligustrum ovalifolium</i> Hassk.	Oleaceae	1	SRNyMA
Trueno	<i>Ligustrum lucidum</i> W. T. Aiton	Oleaceae	2	CBTIS 130 ITD
Trueno común	<i>Ligustrum japonicum</i> Thunb.	Oleaceae	6	PROFEPA SRNyMA CIIDIR

SRNyMA: Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente; PROFEPA: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente; ITD: Instituto Tecnológico de Durango; CBTIS 130: Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicios 130; CIIDIR: Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional.

El material vegetal colectado se secó durante 5 días, se pulverizó, y se almacenó en bolsas de papel en obscuridad a temperatura ambiente.

5.4 Preparación de extractos

La preparación de los extractos fenólicos foliares se realizó de acuerdo a Markham y Campos (1996). Cuatro gramos de tejido seco y molido se combinaron con 100 mL de metanol al 80% y se sonicaron durante 30 minutos. Las muestras se centrifugaron (8000 rpm por 10 minutos a temperatura ambiente) para obtener los extractos crudos. A partir de los extractos crudos se tomaron alícuotas para realizar las determinaciones espectrométricas y cromatográficas que se mencionan a continuación.

5.5 Determinación de fenoles totales

Este método espectrofotométrico se realizó por triplicado. A 125 μL de muestra se agregaron 1.25 mL de agua bidestilada y 62.5 μL de reactivo comercial de Folin–Ciocalteu. Las muestras se agitaron 5 min. Posteriormente, se agregaron 187 μL de Na_2CO_3 (al 20%) y se dejaron en incubación durante 2 horas a temperatura ambiente, en obscuridad. Después de ese tiempo se registraron los valores de absorbancia a 760 nm. Las concentraciones de fenoles totales se calcularon a partir de una curva estándar ($A_{760\text{nm}} = 0.0557 [\text{ácido gálico}] + 0.0598$, $r = 0.9948$), construida con concentraciones entre 4 y 76 $\mu\text{g/mL}$ de ácido gálico. Los valores se expresaron como miligramos equivalentes de ácido gálico por gramo de extracto seco (mg EAG/g ES).

5.6 Determinación de taninos condensados

Los niveles de taninos condensados se estimaron de acuerdo a Julkunen-Tiitto (1985). Cada muestra se trabajó por triplicado. A 200 μL de extracto crudo se le adicionó 1mL de vainillina al 4% en metanol y 500 μL de HCL concentrado. Las mezclas se agitaron a temperatura ambiente durante 20 min. Después, se registraron los valores de absorbancia a 500 nm. Las concentraciones se estimaron a partir de una curva estándar ($A_{500\text{nm}} = 0.0015 [\text{epicatequina}] - 0.083$), $r = 0.9948$), construida con concentraciones entre 5 y 200 $\mu\text{g/mL}$ de epicatequina. Los valores se expresaron como miligramos equivalentes de epicatequina por gramo de extracto seco (mg EEC/g ES).

5.7 Determinación de los perfiles fenólicos

Para la determinación de los perfiles fenólicos foliares, los extractos crudos se fraccionaron con acetato de etilo (en proporción 1:1 v/v) para obtener una fracción enriquecida de compuestos fenólicos en la fase orgánica. Esta última se concentró a sequedad y se resuspendió en 2 mL de metanol. La determinación de los perfiles de compuestos fenólicos se realizó en alícuotas de 50 μ L de los extractos resuspendidos en metanol, por cromatografía líquida de alta resolución con detector de arreglo de diodos (HPLC-DAD). Tanto el cromatógrafo como el DAD fueron marca Perkin Elmer modelo Series 200. La columna usada fue Perkin Elmer Brownlee Analytical C18 (4.6 x 250 mm, 5 μ m). El método en gradiente usado fue el descrito por Campos y Markham (2007). Este método usa agua acidificada a pH 2.5 con ácido fosfórico como solvente A y acetonitrilo como solvente B. Ambos solventes se mezclaron de acuerdo al siguiente gradiente: iniciando con 100% de A, disminuyendo a 91% a los 12 min, al 87% a los siguientes 8 min, al 67% a los siguientes 12 min, al 57% a los siguientes 10 min, manteniendo ese nivel hasta el final de los 60 min que dura el análisis. Los cromatogramas se registraron a 260 y a 340 nm. Los espectros de cada compuesto se registraron entre 200 y 400 nm. Se obtuvo información estructural para cada compuesto resuelto en los cromatogramas por comparación de los tiempos de retención (TR) y espectros UV de cada uno de los compuestos resueltos con los de los siguientes estándares: ácido caféico (TR: 53.13 min, λ_{max} : 239sh, 295sh, 318), ácido *p*-cumárico (TR: 37.2, λ_{max} : 293sh, 308), quercetina (TR: 47.05 min, λ_{max} : 255, 268sh, 299sh, 370), quercitrina (quercetina-3-O-ramnósido, TR: 38.54 min, λ_{max} : 255, 264sh, 295sh, 348), morina (TR: 45.4 min, λ_{max} : 254, 264sh, 298sh, 354), hesperidina (TR: 39.34 min, λ_{max} : 284, 335sh), y naringenina (TR: 52.25 min, λ_{max} : 289, 335sh). La teoría UV de los flavonoides y ácidos fenólicos desarrollada por Campos y Markham (2007) fue muy útil para interpretar los espectros UV de los diferentes compuestos fenólicos resueltos en los cromatogramas. La interpretación de los espectros con base en esa teoría ayudó también a obtener información estructural.

5.8 Análisis de datos

Todas las determinaciones se llevaron a cabo para tres muestras independientes de cada especie. Los resultados se sometieron a un análisis de varianza ($p < 0.05$) y las medias se separaron por la prueba de Tukey. Con los valores de las concentraciones de fenoles totales y de taninos, de manera separada se hicieron análisis de agrupamiento, utilizando el programa de cómputo Past. Las asociaciones entre las concentraciones de contaminantes en el aire y las concentraciones de compuestos fenólicos se realizaron por análisis de correlación lineal, usando el mismo programa Past.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos de los contaminantes del aire en la ciudad de Durango fueron proporcionados por la SRNyMA (Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente). En la Tabla 4 se presentan para cada uno de los cinco sitios de estudio.

Tabla 4. Datos de calidad del aire en la cd de Durango proporcionados por la SRNyMA Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente).

Temporada	Temperatura (°C)	O ₃ (ppm)	NO _x (ppm)	SO ₂ (ppm)	CO (ppm)	PM 10 (µg/m ³)	PM 2.5 (µg/m ³)
CIIDIR							
Invierno	21.3	19.8	35.9	1.4	5	71.46	213.1
Primavera	23.1	28.3	15.1	0.2	0.78	151.52	25.16
Verano	23.1	28.1	3.5	0.6	1.03	16.04	12.68
Otoño	19.9	41.2	9.6	0.8	2.61	170.97	29.04
ITD							
Invierno	22.4	52.52	24.3	-	0.559	99	-
Primavera	21.9	27.88	18.91	0.3	0.353	42.2	-
Verano	22.4	33.12	9.61	4.43	0.255	40.4	-
Otoño	22.6	28.11	35.02	4.93	0.236	65.3	-
SRNyMA							
Invierno	22.4	-	8.8	3.7	-	74.1	0.5
Primavera	25.2	-	-	3.8	0.81	16.4	1.2
Verano	22.1	34.3	-	3.3	1.97	22.8	6.7
Otoño	21.6	10.5	14.21	4	-	38.6	11.3
CBTIS 130							
Invierno	-	-	-	-	-	86	-
Primavera	-	-	-	-	-	66	-
Verano	-	-	-	-	-	52	-
PROFEPA							
Invierno	-	-	-	-	-	47	-
Primavera	-	-	-	-	-	49	-
Verano	-	-	-	-	-	30	-

SRNyMA: Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente; PROFEPA: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente; ITD: Instituto Tecnológico de Durango; CBTIS 130: Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicios 130; CIIDIR: Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional.

Ppm: Partículas por millón, µg/m³: microgramos por metro cubico, °C: grados centígrados, O₃: ozono, NO_x: óxido de nitrógeno, SO₂: dióxido de azufre, CO: monóxido de carbono, PM10: material particulado menor de 10 micrómetros, PM 2.5: material particulado menor a 2.5 micrómetros

6.1 Fenoles totales

En las Tablas 5 a 9 se presentan los resultados de las estimaciones de los fenoles totales foliares de cada muestra analizada en cada sitio en cuatro épocas del año. Los contenidos de fenoles totales variaron significativamente entre las ocho especies analizadas. *Schinus terebinthifolius* (pirul chino) fue la especie que presentó la mayor cantidad de fenoles totales, con 65.69 mg/g ES en agosto de 2016 en el sitio CIIDIR (Tabla 9), mientras que *Ligustrum japonicum*, colectada en el sitio SRNyMA en noviembre de 2016, fue la que tuvo el valor más bajo, con 0.64 mg/g ES (Tabla 6). Sin embargo, el valor más alto encontrado para *Schinus terebinthifolius* fue más bajo que el encontrado en tejidos foliares de plantas herbáceas adultas, como *Physalis patula* y *Physalis hederifolia* var. *hederifolia* (129 y 86.51 mg/g tejido seco, respectivamente) reportados por Medina-Medrano *et al.* (2015), y también fue más bajo que los de hojas de especies arbóreas, como *Quercus chihuahuensis* (entre 280.30 y 369.74 mg/g peso seco) reportados por Arámbula-Salazar *et al.* (2015). Variaciones específicas en los contenidos de fenoles totales también han sido reportadas por Medina-Medrano *et al.*, (2015) para los tejidos foliares de especies del género *Physalis*.

Un análisis de agrupamiento basado en las concentraciones de fenoles totales de cada especie colectada en los diferentes sitios y en las diferentes épocas del año reveló que las variaciones fueron especie-específicas (Figura 4).

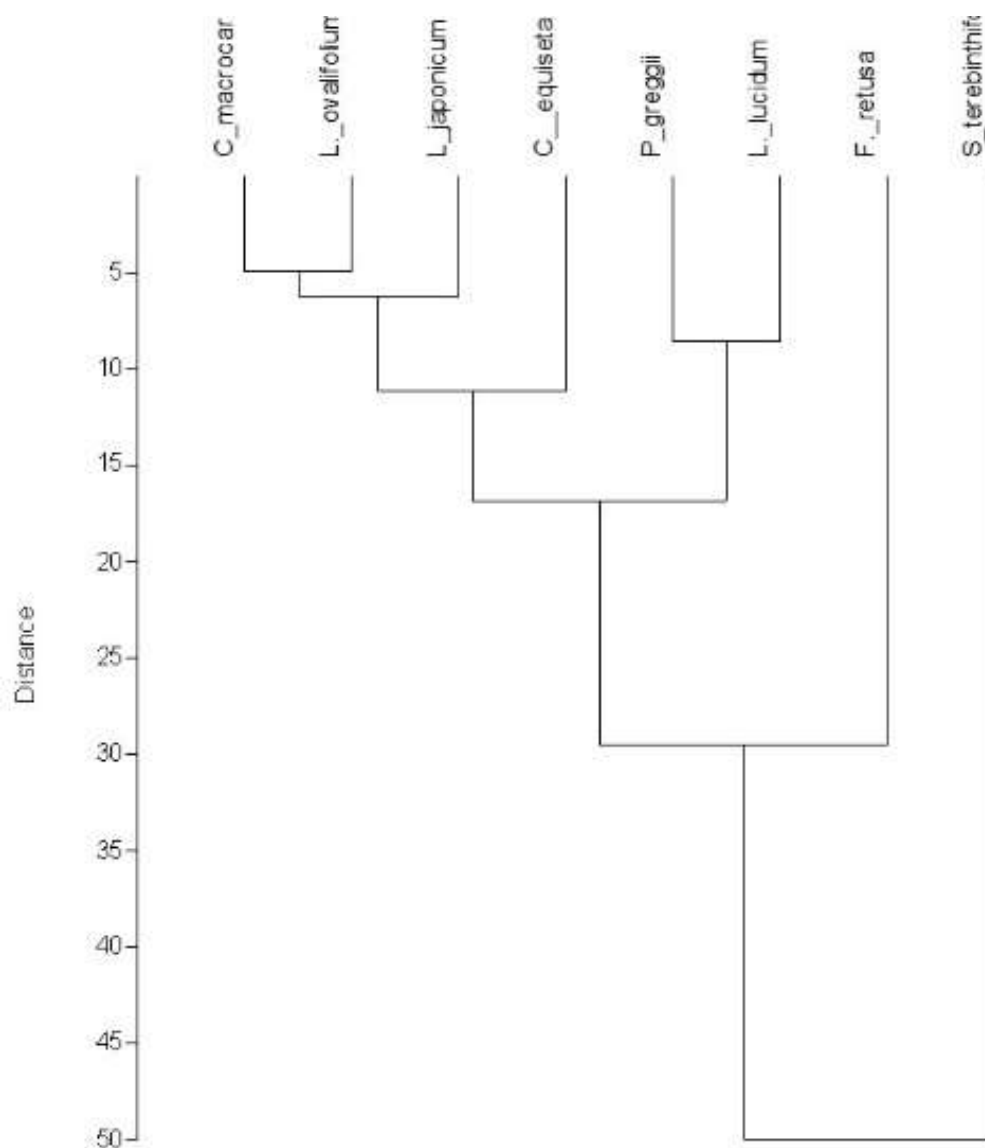


Figura 4. Resultados de un análisis de agrupamiento basado en las concentraciones de fenoles totales en cuatro épocas del año, de ocho especies de plantas que crecen en cinco sitios diferentes de la ciudad de Durango, México.

En todos los sitios, las diferentes especies analizadas acumularon las concentraciones más bajas de fenoles totales en otoño (noviembre), variando de 0.64 mg/g ES en *L. japonicum* de SRNyMA, a 13.66 mg/g ES en *S. terebinthifolius* de PROFEPA, esto como consecuencia de una clara tendencia de disminución en el contenido de fenoles totales en todas las especies en esa temporada del año. Un análisis de agrupamiento basado en las concentraciones de fenoles totales de las

diferentes especies analizadas en cuatro épocas del año reveló que las variaciones de esas concentraciones estuvieron asociadas a las épocas del año (Figura 5). Los presentes resultados están en desacuerdo con los reportados por Raal *et al.* (2015), quienes informaron que la variación estacional de compuestos fenólicos fue específica para cada una de las cuatro especies de *Betula* que analizaron, indicando que no observaron ninguna tendencia general.

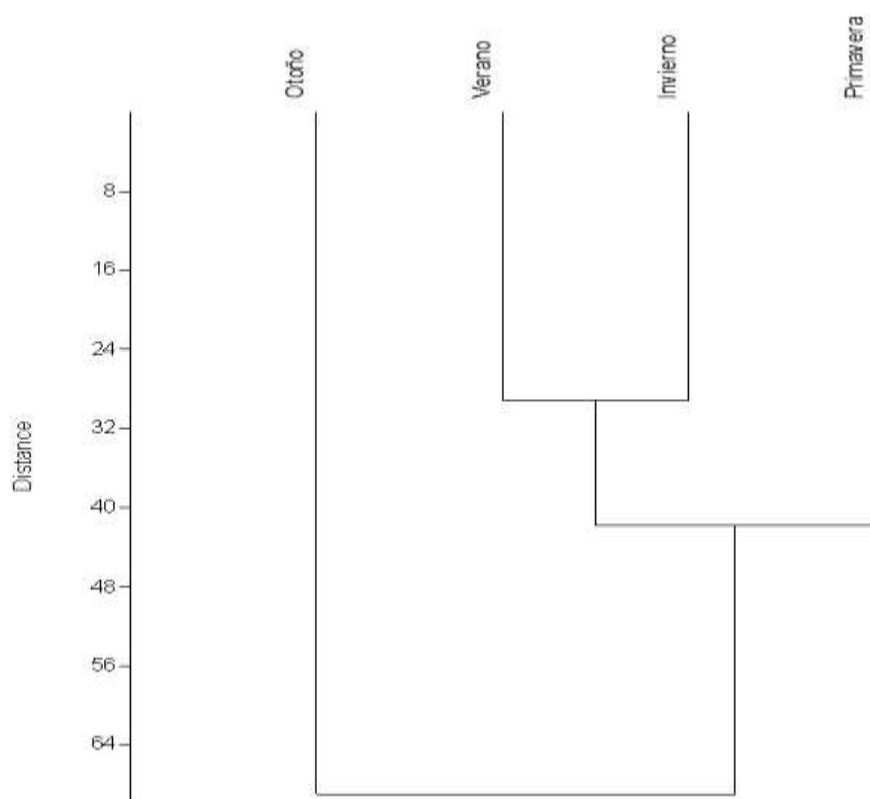


Figura 5. Resultados de un análisis de agrupamiento basado en las concentraciones de fenoles totales que ocho especies de plantas que crecen en cinco sitios diferentes de la ciudad de Durango, México acumularon en cuatro épocas del año.

Además de las diferencias en la temperatura y humedad características de cada estación del año, las cuales se han reportado como factores que modulan la acumulación de compuestos fenólicos (Aninbon *et al.* 2016), la contaminación del

aire también se considera un factor importante que afecta los niveles de compuestos fenólicos de las plantas (Rezanejad, 2012).

Algunas especies estuvieron representadas por dos individuos en un mismo sitio, tal es el caso de *L. japonicum* y *S. terebinthifolius* en el sitio PROFEPA (Tabla 5), y *L. japonicum* en el sitio CIIDIR (Tabla 9). En el sitio PROFEPA, ambos individuos de *L. japonicum* tuvieron concentraciones comparables (aunque significativamente diferentes) de fenoles totales en invierno (30.5 y 36.9 mg/g ES para los individuos 1 y 2, respectivamente) y en primavera (21.30 y 19.47 mg/g ES para los individuos 1 y 2, respectivamente). La comparación entre esos individuos en verano y otoño no pudo realizarse porque el individuo 2 de *L. japonicum* estaba muerto para el mes de agosto. En el mismo sitio PROFEPA, los dos individuos de *S. terebinthifolius* tuvieron valores comparables de fenoles totales en cada una de las épocas de muestreo (Tabla 5). Lo mismo ocurrió con los dos individuos de *L. japonicum* en el sitio CIIDIR, en cada una de las épocas, aunque menos claramente en verano (Tabla 9).

Tabla 5. Concentración de fenoles totales (mg EAG/g ES) de tres especies de plantas en cuatro épocas de año del sitio PROFEPA (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente).

Nombre Común	Nombre Científico	Muestreo 1 (Invierno)	Muestreo 2 (Primavera)	Muestreo 3 (Verano)	Muestreo 4 (Otoño)
Trueno común	<i>L. japonicum</i> (individuo 1)	30.50 ± 0.1 ^c	21.30 ± 0.20 ^c	21.62 ± 0.70 ^c	2.57 ± 0.08 ^d
Pirul chino	<i>S. terebinthifolius</i> (individuo 1)	58.19 ± 1.6 ^a	35.73 ± 0.48 ^b	55.83 ± 0.36 ^b	10.40 ± 0.06 ^b
Trueno común	<i>L. japonicum</i> (individuo 2)	36.90 ± 1.3 ^b	19.47 ± 0.10 ^d	M	M
Pirul chino	<i>S. terebinthifolius</i> (individuo 2)	55.36 ± 1.6 ^a	47.19 ± 0.21 ^a	63.42 ± 1.08 ^a	13.66 ± 0.17 ^a
Cedro limón	<i>C. macrocarpa</i>	34.00 ± 0.4 ^b	18.59 ± 0.09 ^e	18.73 ± 0.13 ^d	5.01 ± 0.12 ^c

M: individuo muerto.

Los valores representan la media y la desviación estándar de tres análisis independientes. Diferentes letras dentro de una misma línea indican diferencias

significativas ($p < 0.05$) de acuerdo a la prueba de discriminación de medias de Tukey.

Tabla 6. Concentración de fenoles totales (mg EAG/g ES) de tres especies de plantas en cuatro épocas de año del sitio SRNyMA (Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente).

Nombre Común	Nombre Científico	Muestreo 1 (Invierno)	Muestreo 2 (Primavera)	Muestreo 3 (Verano)	Muestreo 4 (Otoño)
Trueno común	<i>L. japonicum</i>	24.51 ± 0.89 ^c	11.36 ± 1.00 ^d	10.03 ± 0.17 ^e	0.64 ± 0.06 ^d
Cedro limón	<i>C. macrocarpa</i>	15.84 ± 0.25 ^d	15.69 ± 0.08 ^c	21.18 ± 0.16 ^c	5.47 ± 0.02 ^b
Casuarina	<i>C. equisetifolia</i>	37.04 ± 0.36 ^a	25.74 ± 0.36 ^a	29.11 ± 0.29 ^a	4.28 ± 0.08 ^c
Pino prieto	<i>P. greggii</i>	23.10 ± 1.30 ^c	21.79 ± 0.11 ^{a b}	12.08 ± 0.05 ^d	4.47 ± 0.14 ^c
Trueno jamaquino	<i>L. ovalifolium</i>	34.64 ± 0.26 ^b	19.30 ± 3.24 ^{b c}	23.11 ± 0.21 ^b	7.07 ± 0.23 ^a

Los valores representan la media y la desviación estándar de tres análisis independientes. Diferentes letras dentro de una misma línea indican diferencias significativas ($p < 0.05$) de acuerdo a la prueba de discriminación de medias de Tukey.

Tabla 7. Concentración de fenoles totales (mg EAG/g ES) de tres especies de plantas en cuatro épocas de año del sitio ITD (Instituto Tecnológico de Durango).

Nombre común	Nombre científico	Muestreo 1 (Invierno)	Muestreo 2 (Primavera)	Muestreo 3 (Verano)	Muestreo 4 (Otoño)
Cedro limón	<i>C. macrocarpa</i>	24.87 ± 0.16 ^a	21.86 ± 0.54 ^b	21.02 ± 0.19 ^a	8.57 ± 0.19 ^a
Laurel de la India	<i>F. retusa</i>	24.02 ± 0.57 ^a	46.37 ± 0.31 ^a	11.44 ± 0.05 ^c	4.35 ± 0.01 ^b
Trueno jamaquino	<i>L. lucidum</i>	8.19 ± 0.07 ^b	13.89 ± 0.22 ^c	13.94 ± 0.07 ^b	2.09 ± 0.04 ^c

Los valores representan la media y la desviación estándar de tres análisis independientes. Diferentes letras dentro de una misma línea indican diferencias significativas ($p < 0.05$) de acuerdo a la prueba de discriminación de medias de Tukey.

Tabla 8. Concentración de fenoles totales (mg EAG/g ES) de tres especies de plantas en cuatro épocas de año del sitio CBTIS 130 (Centro de Bachillerato Tecnológico 130).

Nombre Común	Nombre Científico	Muestreo 1 (Invierno)	Muestreo 2 (Primavera)	Muestreo 3 (Varano)	Muestreo 4 (Otoño)
Trueno común	<i>L. japonicum</i>	14.86 ± 0.54 ^c	48.07 ± 0.47 ^a	14.47 ± 0.05 ^b	2.49 ± 0.08 ^c
Pirul chino	<i>S. terebinthifolius</i>	59.40 ± 0.52 ^a	8.91 ± 0.13 ^c	57.73 ± 0.35 ^a	11.09 ± 0.20 ^a
Trueno jamaiquino	<i>L. lucidum</i>	21.61 ± 0.44 ^b	30.26 ± 0.14 ^b	13.38 ± 0.02 ^c	3.32 ± 0.09 ^b

Los valores representan la media y la desviación estándar de tres análisis independientes. Diferentes letras dentro de una misma línea indican diferencias significativas ($p < 0.05$) de acuerdo a la prueba de discriminación de medias de Tukey.

Tabla 9. Concentración de fenoles totales (mg EAG/g ES) de tres especies de plantas en cuatro épocas de año del sitio CIIDIR (Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional).

Nombre Común	Nombre Científico	Muestreo 1 (Invierno)	Muestreo 2 (Primavera)	Muestreo 3 (Varano)	Muestreo 4 (Otoño)
Trueno común	<i>L. japonicum</i> (individuo 1)	13.00 ± 0.82 ^c	22.10 ± 0.21 ^b	16.31 ± 0.12 ^c	2.80 ± 0.15 ^d
Pirul chino	<i>S. terebinthifolius</i>	25.61 ± 0.48 ^b	56.43 ± 0.23 ^a	65.69 ± 0.48 ^a	12.75 ± 0.04 ^a
Trueno común	<i>L. japonicum</i> (individuo 2)	10.66 ± 0.04 ^d	18.96 ± 0.32 ^c	34.01 ± 0.51 ^b	4.16 ± 0.11 ^c
Cedro limón	<i>C. macrocarpa</i>	29.01 ± 0.51 ^a	18.71 ± 0.24 ^c	10.04 ± 0.10 ^d	10.18 ± 0.14 ^b

Los valores representan la media y la desviación estándar de tres análisis independientes. Diferentes letras dentro de una misma línea indican diferencias significativas ($p < 0.05$) de acuerdo a la prueba de discriminación de medias de Tukey.

Ligustrum japonicum fue colectada en cuatro de los cinco sitios analizados, *C. macrocarpa* en cuatro, *S. terebinthifolius* en tres, y *L. lucidum* en dos. Las respectivas concentraciones de fenoles totales en cada una de las cuatro épocas del año analizadas se presentan en las Tablas 9.1 a 9.4. En estas Tablas se observa que además de la variabilidad encontrada entre dos individuos de la misma especie en una misma localidad, como es el caso de *L. japonicum* (Tabla 9.1) y *S.*

terebinthifolius (Tabla 9.3), lo cual es natural en todas las poblaciones, se observan también diferencias de mayor magnitud entre los individuos de la misma especie pero colectados en sitios diferentes. Las concentraciones de fenoles totales de *L. japonicum* variaron de 10.66 a 36.94 mg EAG/g ES en invierno (Tabla 9.1), lo que representa que en el sitio PROFEPA esta especie acumuló 3.46 veces más fenoles totales que en el sitio CIIDIR en esa época del año, en el sitio CBTIS 130 acumuló 4.23 veces más que en el sitio CIIDIR en primavera, 3.39 veces más en el sitio CIIDIR que en el sitio SRNyMA en verano, y 6.5 veces más en el sitio CIIDIR que en el sitio SRNyMA en otoño.

Tabla 9.1 Concentración de fenoles totales (mg EAG/g ES) de *Ligustrum japonicum* colectado en cuatro sitios en cuatro épocas del año.

<i>Ligustrum japonicum</i>	Invierno	Primavera	Verano	Otoño
PROFEPA (individuo 1)	30.6 ± 0.16 ^b	21.3 ± 0.20 ^b	21.6 ± 0.71 ^b	2.6 ± 0.09 ^{b c}
PROFEPA (individuo 2)	36.94 ± 1.35 ^a	19.47 ± 0.10 ^c	M	M
SRNyMA	24.51 ± 0.89 ^c	11.36 ± 1.00 ^d	10.03 ± 0.17 ^e	0.64 ± 0.06 ^d
CBTIS 130	14.86 ± 0.55 ^d	48.07 ± 0.47 ^a	14.47 ± 0.05 ^d	2.49 ± 0.08 ^c
CIIDIR (individuo 1)	13.00 ± 0.82 ^d	22.11 ± 0.21 ^b	16.32 ± 0.13 ^c	2.80 ± 0.15 ^b
CIIDIR (individuo 2)	10.66 ± 0.04 ^e	18.96 ± 0.32 ^c	34.01 ± 0.52 ^a	4.16 ± 0.11 ^a

Los valores representan la media y la desviación estándar de tres análisis independientes. Diferentes letras dentro de una misma columna indican diferencias significativas ($p < 0.05$) de acuerdo a la prueba de discriminación de medias de Tukey.

Cupressus macrocarpa (Tabla 9.2) acumuló 2.15 veces más fenoles totales en el sitio PROFEPA que en el sitio SRNyMA en invierno, 1.39 veces más en el sitio ITD que en el sitio SRNyMA en primavera, 2.10 veces más en el sitio SRNyMA que en el sitio CIIDIR en verano, y 2.03 veces más en el sitio CIIDIR que en el sitio PROFEPA en otoño.

Tabla 9.2. Concentración de fenoles totales (mg EAG/g ES) de *Cupressus macrocarpa* colectada en cuatro sitios en cuatro épocas del año.

<i>Cupressus macrocarpa</i>	Invierno	Primavera	Verano	Otoño
PROFEPA	34.02 ± 0.45 ^a	18.59 ± 0.09 ^b	18.74 ± 0.13 ^b	5.01 ± 0.13 ^d
SRNyMA	15.85 ± 0.25 ^d	15.69 ± 0.08 ^c	21.18 ± 0.17 ^a	5.47 ± 0.03 ^c
ITD	24.88 ± 0.70 ^c	21.86 ± 0.54 ^a	21.03 ± 0.19 ^a	8.57 ± 0.19 ^b
CIIDIR	29.01 ± 0.52 ^b	18.71 ± 0.24 ^b	10.04 ± 0.10 ^c	10.18 ± 0.14 ^a

Los valores representan la media y la desviación estándar de tres análisis independientes. Diferentes letras dentro de una misma columna indican diferencias significativas ($p < 0.05$) de acuerdo a la prueba de discriminación de medias de Tukey.

Schinus terebinthifolius (Tabla 9.3) acumuló 2.31 veces más fenoles totales en el sitio CBTIS 130 que en el sitio CIIDIR en invierno, 6.33 veces más en el sitio CIIDIR que en el sitio CBTIS 130 en primavera, 1.19 veces más en el sitio CIIDIR que en el sitio PROFEPA en verano, y 1.23 veces más en el sitio PROFEPA que en el sitio CBTIS 130.

Tabla 9.3. Concentración de fenoles totales (mg EAG/g ES) de *Schinus terebinthifolius* colectado en tres sitios en cuatro épocas del año.

<i>Schinus terebinthifolius</i>	Invierno	Primavera	Verano	Otoño
PROFEPA (individuo1)	58.19 ± 1.63 ^{a b}	35.73 ± 0.48 ^c	55.83 ± 0.37 ^d	10.41 ± 0.07 ^d
PROFEPA (individuo 2)	55.36 ± 1.63 ^b	47.19 ± 0.21 ^b	63.42 ± 1.08 ^b	13.66 ± 0.17 ^a
CBTIS 130	59.41 ± 0.53 ^a	8.91 ± 0.13 ^d	57.73 ± 0.35 ^c	11.09 ± 0.21 ^c
CIIDIR	25.62 ± 0.49 ^c	56.43 ± 0.23 ^a	66.70 ± 0.48 ^a	12.75 ± 0.04 ^b

Los valores representan la media y la desviación estándar de tres análisis independientes. Diferentes letras dentro de una misma columna indican diferencias significativas ($p < 0.05$) de acuerdo a la prueba de discriminación de medias de Tukey.

Ligustrum lucidum colectado en el sitio CBTIS 130 acumuló 2.65 veces más fenoles totales que en el sitio ITD en invierno, 2.21 veces más en el sitio CBTIS 130 que en el sitio ITD en primavera, 1.04 veces más en el sitio ITD que en el sitio CBTIS 130 en verano, y 1.58 veces más en el sitio CBTIS 130 que en el ITD en otoño.

Tabla 9.4 Concentración de fenoles totales (mg EAG/g ES) de *Ligustrum lucidum* colectado en dos sitios en cuatro épocas del año.

<i>Ligustrum lucidum</i>	Invierno	Primavera	Verano	Otoño
ITD	8.20 ± 0.07 ^b	13.89 ± 0.22 ^b	13.95 ± 0.07 ^a	2.10 ± 0.04 ^b
CBTIS 130	21.61 ± 0.45 ^a	30.26 ± 0.14 ^a	13.39 ± 0.03 ^b	3.32 ± 0.09 ^a

Los valores representan la media y la desviación estándar de tres análisis independientes. Diferentes letras dentro de una misma columna indican diferencias significativas ($p < 0.05$) de acuerdo a la prueba de discriminación de medias de Tukey.

Las variaciones en la concentración de fenoles foliares de una misma especie crecida en sitios diferentes sugiere que las plantas analizadas responden ajustando su metabolismo de producción de compuestos fenólicos a cambios ambientales, pudiendo ser estos cambios variaciones en los niveles de contaminantes atmosféricos. Respuestas de este tipo han sido reportados no solo para los compuestos fenólicos sino también para proteínas del polen de *Thuja orientalis* (Rezanejad, 2009).

6.1.1 Correlación entre contenidos de fenoles totales y niveles de contaminantes del aire

Los resultados de los análisis de la correlación entre la variación de contaminantes del aire y la de las concentraciones de fenoles totales foliares se muestran en las Tablas 9.5 a 9.20. Para las especies del sitio PROFEPA, la SRNyMA únicamente proporcionó los datos de concentración de partículas PM10 para las temporadas de invierno, primavera, y verano. Considerando esos valores, los dos individuos de *S. terebinthifolius* mostraron las correlaciones más altas. Éstas fueron negativas, lo que indica que conforme las concentraciones de PM10 aumentan, *S. terebinthifolius* tiende a acumular menores concentraciones de fenoles totales foliares (Tabla 9.5).

Tabla 9.5. Correlación entre la variación de los niveles de partículas PM10 y la concentración de fenoles totales de tres especies encontradas en el sitio PROFEPA (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente).

Especie	Correlación	Significancia de la correlación
<i>Ligustrum japonicum</i>	0.38667	0.74725
<i>Schinus terebinthifolius</i> (Individuo 1)	-0.49646	0.66927
<i>Schinus terebinthifolius</i> (Individuo 2)	-0.90831	0.27475
<i>Cupressus macrocarpa</i>	0.40755	0.73277

Para las especies del sitio ITD, la SRNyMA proporcionó los datos de concentración de O₃, NO_x, SO₂, CO, y partículas PM10 para las temporadas de invierno, primavera, verano y otoño. Considerando esos valores, *C. macrocarpa*, mostró las correlaciones más altas y positivas con los contenidos de O₃ (0.59722) y CO (0.6984) (Tablas 9.6 y 9.9). *L. lucidum* mostró una correlación alta positiva (0.9351) con NO_x, mientras que *C. macrocarpa* mostró una correlación alta negativa (-0.6813) con este mismo tipo de contaminante (Tabla 8.7). *L. lucidum*, *C. macrocarpa*, y *F. retusa* mostraron altas correlaciones negativas con SO₂, siendo la de *F. retusa* la más alta (-0.99822) (Tabla 9.8). Importantes relaciones positivas con los niveles de CO las mostraron *C. macrocarpa* y *F. retusa* (Tabla 9.9). Con relación a los niveles de PM10, *L. lucidum* tuvo la más alta correlación (-0.5528) (Tabla 9.10).

Tabla 9.6. Correlación entre la variación de los niveles de partículas O₃ y la concentración de fenoles totales de tres especies encontradas en el sitio ITD (Instituto Tecnológico de Durango).

Especie	Correlación	Significancia de la correlación
<i>Cupressus macrocarpa</i>	0.59722	0.40278
<i>Ficus retusa</i>	0.0060983	0.99368
<i>Ligustrum lucidum</i>	-0.058456	0.94154

Tabla 9.7. Correlación entre la variación de los niveles de partículas NO_x y la concentración de fenoles totales de tres especies encontradas en el sitio ITD (Instituto Tecnológico de Durango).

Especie	Correlación	Significancia de la correlación
<i>Cupressus macrocarpa</i>	-0.6813	0.3187
<i>Ficus retusa</i>	-0.28904	0.7109
<i>Ligustrum lucidum</i>	0.9351	0.0649

Tabla 9.8. Correlación entre la variación de los niveles de partículas SO₂ y la concentración de fenoles totales de tres especies encontradas en el sitio ITD (Instituto Tecnológico de Durango).

Especie	Correlación	Significancia de la correlación
<i>Cupressus macrocarpa</i>	-0.62771	0.5679
<i>Ficus retusa</i>	-0.99822	0.03801
<i>Ligustrum lucidum</i>	-0.5798	0.60626

Tabla 9.9. Correlación entre la variación de los niveles de partículas CO y la concentración de fenoles totales de tres especies encontradas en el sitio ITD (Instituto Tecnológico de Durango).

Especie	Correlación	Significancia de la correlación
<i>Cupressus macrocarpa</i>	0.6984	0.3016
<i>Ficus retusa</i>	0.42894	0.57106
<i>Ligustrum lucidum</i>	-0.06472	0.93527

Tabla 9.10. Correlación entre la variación de los niveles de partículas PM₁₀ y la concentración de fenoles totales de tres especies encontradas en el sitio ITD (Instituto Tecnológico de Durango).

Especie	Correlación	Significancia de la correlación
<i>Cupressus macrocarpa</i>	0.14002	0.85998
<i>Ficus retusa</i>	-0.15779	0.84221
<i>Ligustrum lucidum</i>	-0.5528	0.4472

Para las especies del sitio SRNyMA, la SRNyMA únicamente proporcionó los datos de concentración de SO₂, partículas PM₁₀ y 2.5 para las temporadas de invierno, primavera, verano y otoño. Considerando esos valores, para las concentraciones de SO₂, los individuos de *Cupressus macrocarpa* y *Casuarina equisetifolia* mostraron las correlaciones más altas negativas, lo que indica que conforme las concentraciones de SO₂ aumentan, *Cupressus macrocarpa* y *Casuarina equisetifolia*, tienden a acumular menores concentraciones de fenoles totales foliares (Tabla 9.11). Para partículas PM 10 *Ligustrum japonicum* y *ligustrum ovalifolium* mostraron correlaciones positivas más altas, lo que indica que conforme las concentraciones de partículas PM 10 aumentan, las concentraciones de *L. japonicum* y *ovalifolium* las concentraciones de fenoles totales foliares también lo hacen (Tabla 9.12). Mientras que *Casuarina equisetifolia* y *Pinus greggii*, mostraron correlaciones altas negativas para partículas PM 2.5 y la concentración de fenoles totales foliares lo que indica que conforme la aumenta la concentración de partículas PM 2.5 aumenta, la acumulación de fenoles totales foliares de *Casuarina equisetifolia* y *Pinus greggii* disminuyen (Tabla 9.13).

Tabla 9.11. Correlación entre la variación de los niveles de partículas SO₂ y la concentración de fenoles totales de tres especies encontradas en el sitio SRNyMA (Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente).

Especie	Correlación	Significancia de la correlación
<i>Ligustrum japonicum</i>	-0.35585	0.64415
<i>Cupressus macrocarpa</i>	-0.90730	0.09270
<i>Casuarina equisetifolia</i>	-0.62968	0.37032
<i>Pinus greggii</i>	-0.16944	0.83056
<i>Ligustrum ovalifolium</i>	0.51741	0.48259

Tabla 9.12. Correlación entre la variación de los niveles de partículas PM 10 y la concentración de fenoles totales de tres especies encontradas en el sitio SRNyMA (Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente).

Especie	Correlación	Significancia de la correlación
<i>Ligustrum japonicum</i>	0.57490	0.42551
<i>Cupressus macrocarpa</i>	-0.16564	0.83436
<i>Casuarina equisetifolia</i>	0.3168	0.68320
<i>Pinus greggii</i>	0.27064	0.72936
<i>Ligustrum ovalifolium</i>	0.55501	0.44499

Tabla 9.13. Correlación entre la variación de los niveles de partículas PM 2.5 y la concentración de fenoles totales de tres especies encontradas en el sitio SRNyMA (Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente).

Especie	Correlación	Significancia de la correlación
<i>Ligustrum japonicum</i>	0.88928	0.11072
<i>Cupressus macrocarpa</i>	0.5609	0.4391
<i>Casuarina equisetifolia</i>	-0.84843	0.15157
<i>Pinus greggii</i>	-0.99985	0.00015
<i>Ligustrum ovalifolium</i>	-0.80316	0.19604

Para las especies del sitio CBTIS 130, la SRNyMA únicamente proporcionó los datos de concentración partículas PM10 para las temporadas de invierno, primavera y verano. Considerando esos valores, *L. lucidum* mostró la correlación más alta. Éstas fueron positivas, lo que indica que conforme las concentraciones de PM10 aumentan, *L. lucidum* también tiende a acumular concentraciones de fenoles totales foliares (Tabla 9.14).

Tabla 9.14. Correlación entre la variación de los niveles de partículas PM 10 y la concentración de fenoles totales de tres especies encontradas en el sitio CBTIS 130 Centro de Bachillerato Industrial y de Servicios 130).

Especie	Correlación	Significancia de la correlación
<i>Ligustrum japonicum</i>	-0.09129	0.94180
<i>Schinus terebinthifolius</i>	0.13028	0.91682
<i>Ligustrum lucidum</i>	0.39650	0.74045

Para las especies del sitio CIIDIR, la SRNyMA únicamente proporcionó los datos de concentración partículas O_3 , NO_x , SO_2 , CO, PM 10 y 2.5 para las temporadas de invierno, primavera y verano. Considerando esos valores, los individuos de *S. terebinthifolius* y *L. japonicum* mostraron las correlaciones más altas. Éstas fueron negativas, lo que indica que conforme las concentraciones de NO_x , CO y PM 2.5 aumentan, *S. terebinthifolius* y *L. japonicum* tienden a acumular menores concentraciones de fenoles totales foliares (Tabla 8.16, 8.18 y 8.20). Para O_3 , *L. japonicum* y *S. terebinthifolius* presentaron correlación alta positiva lo que indica que las concentración de O_3 y fenoles totales foliares aumentan al mismo tiempo (Tabla 9.15). *L. japonicum* y *C. macrocarpa* mostraron la correlación más alta aunque negativa, lo que indica que conforme la concentración de SO_2 aumenta, la acumulación de fenoles totales foliares decrece (Tabla 9.17). En el caso de la correlación de PM 10 y la concentración de fenoles totales foliares, *L. japonicum* y *C. macrocarpa* mostraron una correlación negativa y positiva respectivamente (Tabla 9.19)

Tabla 9.15. Correlación entre la variación de los niveles de partículas O_3 y la concentración de fenoles totales de tres especies encontradas en el sitio CIIDIR (Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional).

Especie	Correlación	Significancia de la correlación
<i>Ligustrum japonicum</i> (Individuo 1)	0.93708	0.062921
<i>Schinus terebinthifolius</i>	0.65994	0.34006
<i>Ligustrum japonicum</i> (Individuo 2)	0.38413	0.61587
<i>Cupressus macrocarpa</i>	0.34212	0.65788

Tabla 9.16. Correlación entre la variación de los niveles de partículas NO_x y la concentración de fenoles totales de tres especies encontradas en el sitio CIIDIR (Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional).

Especie	Correlación	Significancia de la correlación
<i>Ligustrum japonicum</i> (Individuo 1)	-0.88565	0.11435
<i>Schinus terebinthifolius</i>	-0.90439	0.095606
<i>Ligustrum japonicum</i> (Individuo 2)	-0.87307	0.12693
<i>Cupressus macrocarpa</i>	-0.18582	0.81418

Tabla 9.17. Correlación entre la variación de los niveles de partículas SO₂ y la concentración de fenoles totales de tres especies encontradas en el sitio CIIDIR (Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional).

Especie	Correlación	Significancia de la correlación
<i>Ligustrum japonicum</i> (Individuo 1)	-0.54944	0.45056
<i>Schinus terebinthifolius</i>	-0.34172	0.65828
<i>Ligustrum japonicum</i> (Individuo 2)	-0.37829	0.62171
<i>Cupressus macrocarpa</i>	-0.73534	0.26466

Tabla 9.18. Correlación entre la variación de los niveles de partículas CO y la concentración de fenoles totales de tres especies encontradas en el sitio CIIDIR (Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional).

Especie	Correlación	Significancia de la correlación
<i>Ligustrum japonicum</i> (Individuo 1)	-0.61631	0.38369
<i>Schinus terebinthifolius</i>	-0.54394	0.45606
<i>Ligustrum japonicum</i> (Individuo 2)	-0.61333	0.38667
<i>Cupressus macrocarpa</i>	-0.52193	0.47807

Tabla 9.19. Correlación entre la variación de los niveles de partículas PM 10 y la concentración de fenoles totales de tres especies encontradas en el sitio CIIDIR (Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional).

Especie	Correlación	Significancia de la correlación
<i>Ligustrum japonicum</i> (Individuo 1)	0.37402	0.62598
<i>Schinus terebinthifolius</i>	0.1769	0.8231
<i>Ligustrum japonicum</i> (Individuo 2)	-0.44891	0.55109
<i>Cupressus macrocarpa</i>	0.7835	0.2165

Tabla 9.20. Correlación entre la variación de los niveles de partículas PM 2.5 y la concentración de fenoles totales de tres especies encontradas en el sitio CIIDIR (Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional).

Especie	Correlación	Significancia de la correlación
<i>Ligustrum japonicum</i> (Individuo 1)	-0.87044	0.12956
<i>Schinus terebinthifolius</i>	-0.75174	0.24826
<i>Ligustrum japonicum</i> (Individuo 2)	-0.70531	0.29469
<i>Cupressus macrocarpa</i>	-0.45986	0.54014

Las variaciones observadas en las correlaciones entre las concentraciones de partículas en el aire (O_3 , NO_x , SO_2 , CO , PM_{10} y $PM_{2.5}$) y las concentraciones de fenoles totales de las ocho especies y sitio donde fueron colectadas coinciden con resultados de estudios similares, como el de Robles *et al.* (2003), en el que se reportan correlaciones negativas entre la concentración de fenoles totales para *Pinus halepensis* y los valores de NO ($r = -0.524$, $P < 0.01$) y para O_3 ($r = -0.369$, $P < 0.05$). Esto pone de manifiesto que conforme aumentan los niveles de NO y O_3 , los niveles de fenoles totales decrecen. Resultados similares fueron reportados por Pasqualini *et al.* (2003) para *Pinus halepensis* Mill. que presentaron una correlación positiva entre los efectos causados en la cantidad de fenoles totales y los niveles de NO ($p < 0.001$). En el presente estudio, llevado a cabo en la zona urbana de la ciudad de Durango, se encontraron correlaciones similares a las reportadas por los autores citados (Pasqualini *et al.*, 2003). En la Tabla 9.7 se señalan correlaciones negativas entre la concentración de fenoles totales de *Cupressus macrocarpa* respecto a los

valores de NO_x (-0.6813 con significancia de 0.3187) y, por el contrario, se encontró una correlación positiva entre los valores de O_3 y fenoles totales de la misma muestra de *Cupressus macrocarpa* (0.59722 con significancia de 0.40278, Tabla 9.6). Esto puede considerarse una evidencia del efecto diferenciado que los gases reportados provocan.

La correlación positiva más alta se documentó entre la presencia de fenoles totales y los valores de NO_x en la muestra de *Ligustrum lucidum* (0.93510 con significancia de 0.3187 Tabla 9.7) y por el contrario se encontró una correlación negativa para los niveles de O_3 , (-0.058456 con significancia de 0.94154, Tabla 9.6) en la misma muestra.

En el estudio de Pasqualini *et al.* (2003) para *Pinus halepensis* Mill., también se reporta una correlación positiva entre fenoles totales y SO_2 ($p < 0.05$) lo que indica un aumento en la concentración de fenoles totales como respuesta a la exposición de SO_2 , resultados similares a los que obtuvieron también Zobel y Nighswander (1990) para *Pinus resinosa* y *Pinus nigra* que reaccionan aumentando la cantidad de fenoles totales en sus tejidos foliares cuando aumenta la concentración de SO_2 . En este trabajo la correlación encontrada para la asociación de SO_2 y la correspondiente concentración de fenoles fue negativa para *Ficus retusa*, obteniéndose -0.99828 con significancia de 0.03801 (Tabla 9.8) que indica que mientras los niveles de SO_2 aumentan, la concentración de fenoles totales disminuyen.

Las similitudes y diferencias encontradas en los estudios mencionados anteriormente y los resultados de éste trabajo, pueden deberse a diferentes razones. La investigación de Pasqualini *et al.* (2003) y Robles *et al.* (2015), se realizaron en Marsella, Francia, el primero, en una localidad llamada Etang de Berre que es una laguna cerca del mar mediterráneo donde la altitud y el clima, temperatura, humedad pueden ser factores que influyan en las concentraciones de los compuestos fenólicos y los niveles de gases y partículas presentes en el aire. Dicho estudio solo se realizó por un periodo de 2 meses correspondientes a la primavera, tomando muestras de acículas de *Pinus halepensis* Mill. La segunda investigación se realizó en cinco localidades distribuidas en Marsella, Francia, una

de ellas muy cerca de Berre, área con las mismas condiciones ambientales que puede ser un indicador en la coincidencia de sus resultados. En el caso de la investigación de Zobel y Nighswander (1991) para *Pinus resinosa* y *Pinus nigra*, se llevó a cabo en condiciones controladas en laboratorio; las acículas de las especies de pino tomadas en cuenta para la investigación fueron rociadas directamente con diferentes concentraciones SO_2 , obteniendo respuesta positiva con el aumento de concentraciones de fenoles totales.

En el caso del presente trabajo, los análisis se realizaron por un periodo de 12 meses, con muestreos trimestrales en el primer tercio de cada una de las cuatro estaciones del año, en cinco diferentes zonas de muestreo, aledañas a las estaciones de monitoreo de calidad del aire, de tal manera que las condiciones atmosféricas de los individuos bajo estudio fueran representadas con la mayor certidumbre.

En comparación a los autores arriba citados (Zobel y Nighswander, 1991), en el presente estudio se analizaron ocho especies diferentes de plantas de la zona urbana de la ciudad de Durango, que es una de las zonas en el Estado de Durango en donde existen las más altas concentraciones de partículas y gases en el aire debido principalmente al flujo vehicular.

En comparación con el reporte de Zabel y Nighswander (1990) en el que el material foliar se sometió a dosificaciones controladas de SO_2 en condiciones de laboratorio, las muestras analizadas en el presente estudio respondieron de manera similar en condiciones de crecimiento natural.

6.2 Taninos condensados

Los taninos condensados son más abundantes en las plantas que los taninos hidrolizables (Kumari y Jain, 2012), por lo que en el presente trabajo se hace referencia a los primeros. El método de vainillina para la determinación de taninos condensados se considera que es muy reproducible y sensible (Julkunen-Tiito, 1985). Por esas razones en el presente trabajo se estimaron las concentraciones de taninos condensados con ese método. En las Tablas 10 a 14 se muestra la concentración de taninos encontradas para las ocho especies analizadas en cada

uno de los cinco sitios y en cada una de las temporadas del año. *Ficus retusa* del sitio ITD y colectada en invierno tuvo la concentración más alta de taninos (27.95 mg EEC /g ES), mientras que *L. japonicum* del sitio SRNyMA colectada también en invierno tuvo la menor concentración (0.66 mg EEC/g ES). Comparativamente, solamente *F. retusa* del sitio ITD colectada en invierno (27.95 mg EEC/g ES) (Tabla 12) y *L. lucidum* del sitio CBTIS 130 colectada en primavera y verano (10.72 y 9.81 EEC/g ES, respectivamente) (Tabla 13) tuvieron niveles más altos de taninos que los reportados por Espinosa-Alonso (2006) 64 tipos silvestres y cultivados de frijol (*Phaseolus vulgaris*), los cuales variaron entre 9.490 y 35.700 mg/g ES.

Los resultados de un análisis de agrupamiento basado en las concentraciones de taninos presentes en las diferentes especies analizadas colectadas en cinco sitios y en cuatro épocas del año revelaron que, como las concentraciones de fenoles totales, esas concentraciones fueron especie-específicas (Figura 6).

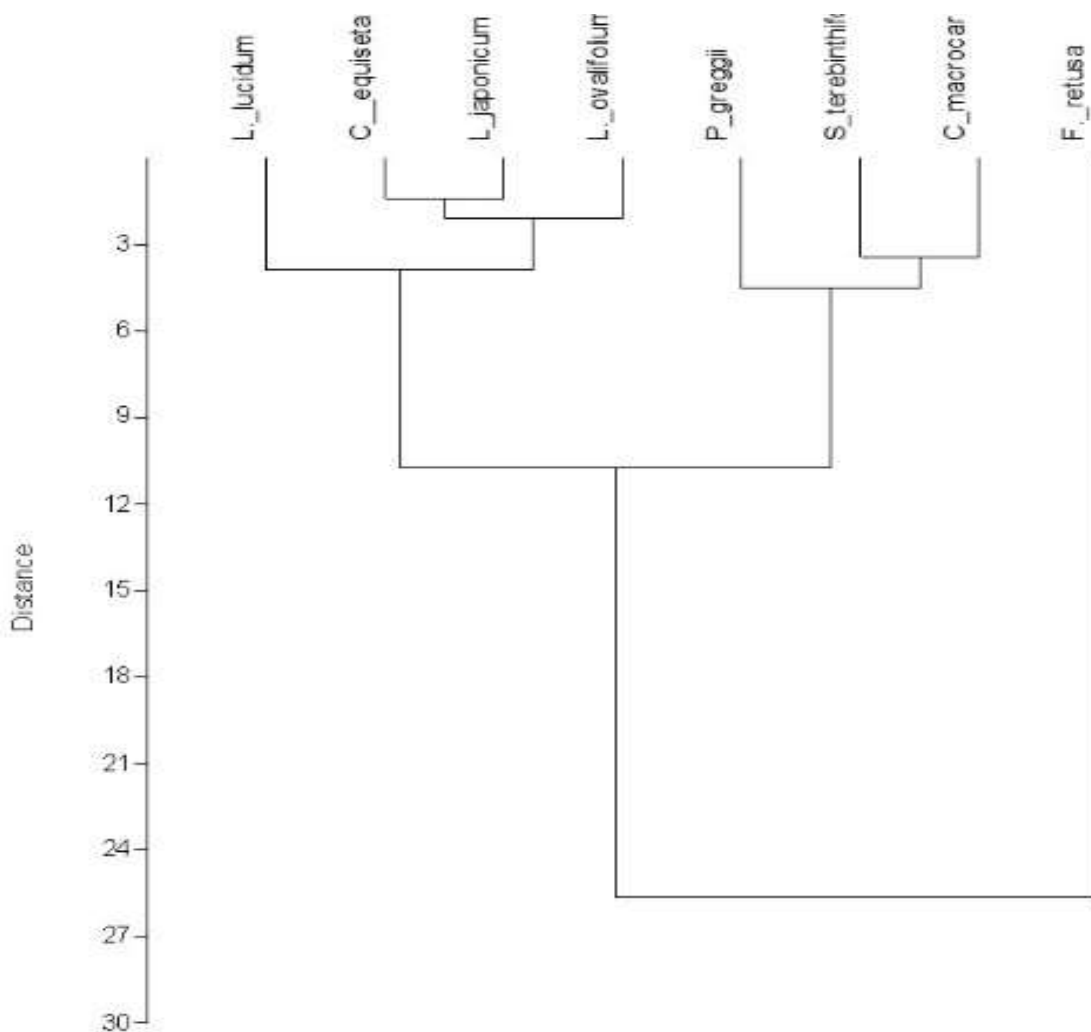


Figura 6. Resultados de un análisis de agrupamiento basado en las concentraciones de taninos en cuatro épocas del año, de ocho especies de plantas que crecen en cinco sitios diferentes de la ciudad de Durango, México.

A diferencia de lo observado con la concentración de fenoles totales, los cuales se presentaron en las concentraciones más bajas en el muestreo de otoño en todos los sitios (Tablas 5-9), las concentraciones de taninos totales no fueron las menores en otoño (Tablas 10-14), excepto en el sitio PROFEPA (Tabla 10). Como lo encontrado en el presente trabajo para las variaciones de las concentraciones de fenoles totales, los resultados sobre las concentraciones de taninos fueron típicas por época del año (Figura 7), y tampoco apoyan los resultados reportados por Raal

et al. (2015), quienes no encontraron una tendencia general en la variación estacional de compuestos fenólicos de cuatro especies de *Betula*.

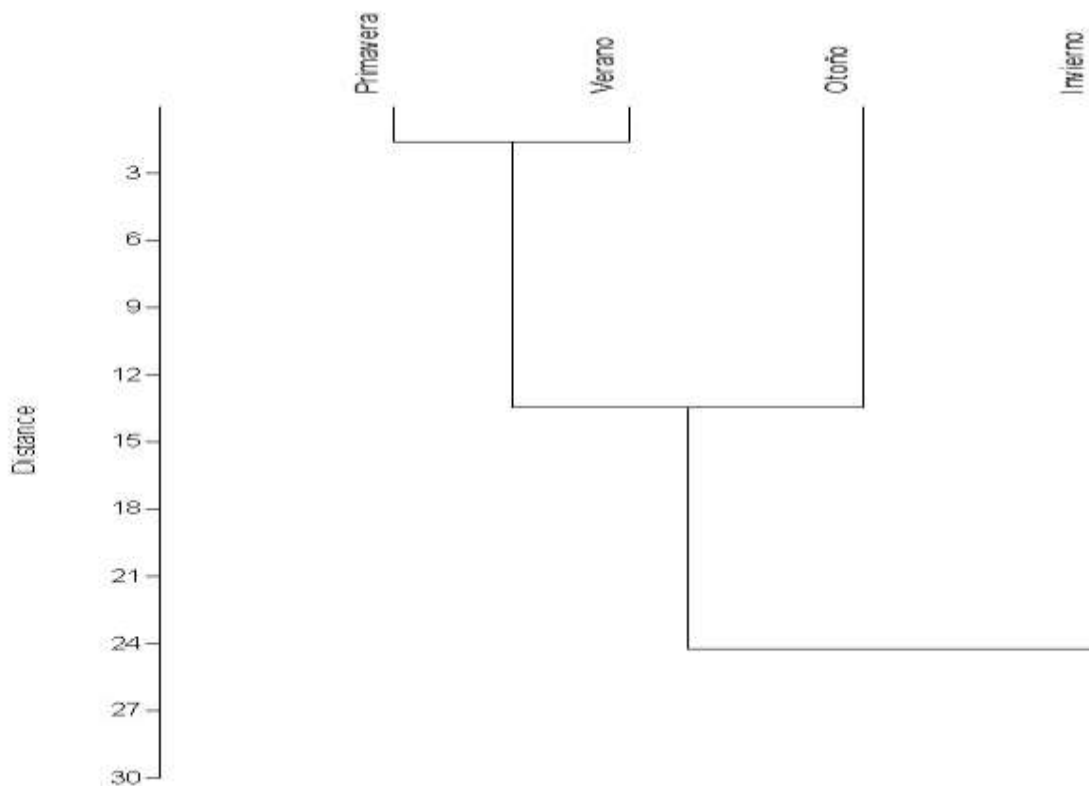


Figura 7. Resultados de un análisis de agrupamiento basado en las concentraciones de taninos que ocho especies de plantas que crecen en cinco sitios diferentes de la ciudad de Durango, México acumularon en cuatro épocas del año.

La concentración foliar de taninos fue menos variable que la de fenoles totales entre los individuos de una misma especie en un mismo sitio. Las concentraciones de *L. japonicum* del sitio PROFEPA (Tabla 10) no fueron significativamente diferentes ni en invierno ni en primavera (Tabla 10), en verano y otoño no se pudieron evaluar los valores porque el individuo 2 murió después del muestreo de primavera. Para los dos individuos de *S. terebinthifolius*, las concentraciones de taninos no fueron significativamente diferentes en invierno y fueron comparables, aunque significativamente diferentes en primavera, verano y otoño.

Tabla 10. Concentración de taninos condensados (mg EEC/g ES) de tres especies de plantas en cuatro épocas de año del sitio PROFEPA (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente).

Nombre común	Nombre científico	Muestreo 1 (Invierno)	Muestreo 2 (Primavera)	Muestreo 3 (Verano)	Muestreo 4 (Otoño)
Trueno común	<i>L. japonicum</i> (individuo 1)	0.57 ± 0.07 ^c	0.50 ± 0.00 ^d	0.53 ± 0.04 ^c	2.73 ± 0.00 ^a
Pirul chino	<i>S. terebinthifolius</i> (individuo 1)	3.69 ± 0.10 ^b	8.19 ± 0.08 ^a	8.96 ± 0.00 ^a	0.11 ± 0.00 ^d
Trueno común	<i>L. japonicum</i> (individuo 2)	0.79 ± 0.04 ^c	0.33 ± 0.10 ^d	M ^d	M ^d
Pirul chino	<i>S. terebinthifolius</i> (individuo 2)	3.82 ± 0.14 ^b	6.14 ± 0.11 ^b	0.42 ± 0.08 ^c	0.44 ± 0.07 ^c
Cedro limón	<i>C. macrocarpa</i>	4.15 ± 0.10 ^a	5.90 ± 0.04 ^c	6.68 ± 0.04 ^b	1.16 ± 0.11 ^b

Los valores representan la media y la desviación estándar de tres análisis independientes. Diferentes letras dentro de una misma línea indican diferencias significativas ($p < 0.05$) de acuerdo a la prueba de discriminación de medias de Tukey.

Tabla 11. Concentración de taninos condensados (mg EEC/g ES) de tres especies de plantas en cuatro épocas de año del sitio SRNyMA (Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente).

Nombre común	Nombre científico	Muestreo 1 (Invierno)	Muestreo 2 (Primavera)	Muestreo 3 (Verano)	Muestreo 4 (Otoño)
Trueno común	<i>L. japonicum</i>	0.66 ± 0.08 ^c	0.22 ± 0.14 ^d	0.18 ± 0.00 ^d	2.36 ± 0.38 ^a
Cedro limón	<i>C. macrocarpa</i>	5.13 ± 0.04 ^b	5.40 ± 0.08 ^b	4.76 ± 0.00 ^b	1.23 ± 0.00 ^b
Casuarina	<i>C. equisetifolia</i>	0.83 ± 0.13 ^c	0.83 ± 0.11 ^c	1.27 ± 0.04 ^c	1.51 ± 0.10 ^b
Pino prieto	<i>Pinus greggii</i>	8.10 ± 0.13 ^a	6.90 ± 0.10 ^a	7.93 ± 0.04 ^a	0.37 ± 0.00 ^c
Trueno jamaicano	<i>L. ovalifolium</i>	0.64 ± 0.00 ^c	0.19 ± 0.03 ^d	0.24 ± 0.07 ^d	0.26 ± 0.15 ^c

Los valores representan la media y la desviación estándar de tres análisis independientes. Diferentes letras dentro de una misma línea indican diferencias significativas ($p < 0.05$) de acuerdo a la prueba de discriminación de medias de Tukey.

Tabla 12. Concentración de taninos condensados (mg EEC/g ES) de tres especies de plantas en cuatro épocas de año del sitio ITD (Instituto Tecnológico de Durango).

Nombre común	Nombre científico	Muestreo 1 (Invierno)	Muestreo 2 (Primavera)	Muestreo 3 (Verano)	Muestreo 4 (Otoño)
Cedro limón	<i>C. macrocarpa</i>	0.64 ± 0.00 ^c	2.21 ± 0.54 ^b	2.25 ± 0.04 ^b	2.21 ± 0.00 ^a
Laurel de la India	<i>F. retusa</i>	27.95 ± 0.11 ^a	6.77 ± 0.10 ^a	6.71 ± 0.08 ^a	1.49 ± 0.00 ^b
Trueno	<i>L. lucidum</i>	4.24 ± 0.07 ^b	0.57 ± 0.00 ^c	0.50 ± 0.00 ^c	0.44 ± 0.07 ^c

Los valores representan la media y la desviación estándar de tres análisis independientes. Diferentes letras dentro de una misma línea indican diferencias significativas ($p < 0.05$) de acuerdo a la prueba de discriminación de medias de Tukey.

Tabla 13. Concentración de taninos condensados (mg EEC/g ES) de tres especies de plantas en cuatro épocas de año del sitio CBTIS 130 (Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicios 130).

Nombre común	Nombre científico	Muestreo 1 (Invierno)	Muestreo 2 (Primavera)	Muestreo 3 (Verano)	Muestreo 4 (Otoño)
Trueno	<i>L. japonicum</i>	0.61 ± 0.04 ^c	2.01 ± 0.00 ^c	2.40 ± 0.07 ^c	3.74 ± 0.30 ^b
Pirul chino	<i>S. terebinthifolius</i>	5.48 ± 0.11 ^a	6.60 ± 0.11 ^b	6.38 ± 0.08 ^b	0.24 ± 0.00 ^c
Trueno	<i>L. lucidum</i>	0.83 ± 0.00 ^b	10.72 ± 0.00 ^a	9.81 ± 0.00 ^a	5.79 ± 0.10 ^a

Los valores representan la media y la desviación estándar de tres análisis independientes. Diferentes letras dentro de una misma línea indican diferencias significativas ($p < 0.05$) de acuerdo a la prueba de discriminación de medias de Tukey.

Tabla 14. Concentración de taninos condensados (mg EEC/g ES) de tres especies de plantas en cuatro épocas de año del sitio CIIDIR (Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional).

Nombre común	Nombre científico	Muestreo 1 (Invierno)	Muestro 2 (Primavera)	Muestreo 3 (Verano)	Muestreo 4 (Otoño)
Trueno	<i>L. japonicum</i> (individuo 1)	0.57 ± 0.11 ^c	0.70 ± 0 ^c	0.68 ± 0.08 ^c	2.08 ± 0.00 ^b
Pirul chino	<i>S. terebinthifolius</i>	2.73 ± 0.00 ^b	3.43 ± 0.08 ^b	3.47 ± 0.08 ^b	0.61 ± 0.04 ^c
Trueno	<i>L. japonicum</i> (individuo 2)	0.66 ± 0.10 ^c	0.50 ± 0.00 ^d	0.66 ± 0.04 ^c	0.98 ± 0.38 ^c
Cedro limón	<i>C. macrocarpa</i>	4.76 ± 0.07 ^a	6.44 ± 0.04 ^a	5.66 ± 0.10 ^a	3.34 ± 0.04 ^a

Los valores representan la media y la desviación estándar de tres análisis independientes. Diferentes letras dentro de una misma línea indican diferencias significativas ($p < 0.05$) de acuerdo a la prueba de discriminación de medias de Tukey.

Las respectivas concentraciones de taninos en cada una de las cuatro épocas del año de las especies que se colectaron en más de un sitio (*L. japonicum*, *C. macrocarpa*, *S. terebinthifolius*, y *L. lucidum*) se presentan en las Tablas 14.1 a 14.4. *L. japonicum* acumuló 1.38 veces más taninos en el sitio PROFEPA que en el sitio CIIDIR en invierno, 9.13 veces más en el sitio CBTIS 130 que en el sitio SRNyMA en primavera, 13.33 veces más en el sitio CBTIS 130 que en el sitio SRNyMA en verano, y 3.85 veces más en el sitio CBTIS 130 que en el sitio CIIDIR en otoño.

Tabla 14.1. Concentración de taninos (mg EEC/g ES) de *Ligustrum japonicum* colectado en cuatro sitios (los sitios son de acuerdo a la Figura 3) en cuatro épocas del año.

<i>Ligustrum japonicum</i>	Invierno	Primavera	Verano	Otoño
PROFEPA (individuo 1)	0.57 ± 0.07 ^b	0.50 ± 0.00 ^c	0.53 ± 0.04 ^c	2.73 ± 0.01 ^b
PROFEPA (individuo 2)	0.79 ± 0.04 ^a	0.33 ± 0.10 ^{c d}	M	M
SRNyMA	0.66 ± 0.08 ^{a b}	0.22 ± 0.14 ^d	0.18 ± 0.00 ^d	2.36 ± 0.38 ^b
CBTIS 130	0.61 ± 0.04 ^{a b}	2.01 ± 0.00 ^a	2.40 ± 0.07 ^a	3.74 ± 0.30 ^a
CIIDIR (individuo 1)	0.57 ± 0.11 ^b	0.70 ± 0.00 ^b	0.68 ± 0.08 ^b	2.08 ± 0.01 ^b
CIIDIR (individuo 2)	0.66 ± 0.10 ^{a b}	0.50 ± 0.00 ^c	0.66 ± 0.04 ^b	0.98 ± 0.38 ^c

Los valores representan la media y la desviación estándar de tres análisis independientes. Diferentes letras dentro de una misma columna indican diferencias significativas ($p < 0.05$) de acuerdo a la prueba de discriminación de medias de Tukey.

Cupressus macrocarpa (Tabla 14.2) acumuló 1.23 veces más taninos en el sitio SRNyMA que en el sitio PROFEPA en invierno, 2.91 veces más en el sitio CIIDIR que en el sitio ITD en primavera, 2.96 veces más en el sitio PROFEPA que en el sitio ITD en verano, y 2.87 veces más en el sitio CIIDIR que en el sitio PROFEPA en otoño.

Tabla 14.2. Concentración de taninos (mg EEC/g ES) de *Cupressus macrocarpa* colectado en cuatro sitios (los sitios son de acuerdo a la Figura 3) en cuatro épocas del año.

<i>Cupressus macrocarpa</i>	Invierno	Primavera	Verano	Otoño
PROFEPA	4.15 ± 0.10 ^c	5.90 ± 0.04 ^b	6.68 ± 0.04 ^a	1.16 ± 0.11 ^c
SRNyMA	5.13 ± 0.04 ^a	5.40 ± 0.08 ^c	4.76 ± 0.00 ^c	1.23 ± 0.00 ^c
ITD	4.24 ± 0.07 ^c	2.21 ± 0.00 ^d	2.25 ± 0.04 ^d	2.21 ± 0.00 ^b
CIIDIR	4.76 ± 0.07 ^b	6.44 ± 0.04 ^a	5.66 ± 0.04 ^b	3.34 ± 0.04 ^a

Los valores representan la media y la desviación estándar de tres análisis independientes. Diferentes letras dentro de una misma columna indican diferencias significativas ($p < 0.05$) de acuerdo a la prueba de discriminación de medias de Tukey.

Schinus terebinthifolius (Tabla 14.3) acumuló 2.00 veces más taninos en el sitio CBTIS 130 que en el sitio CIIDIR en invierno, 2.38 veces más en el sitio PROFEPA que en el sitio CIIDIR en primavera, 2.58 veces más en el sitio PROFEPA que en el sitio CIIDIR en verano, y 5.54 veces más en el sitio CIIDIR que en el sitio PROFEPA en invierno.

Tabla 14.3. Concentración de taninos (mg EEC/g ES) de *Schinus terebinthifolius* colectado en tres sitios (los sitios son de acuerdo a la Figura 3) en cuatro épocas del año.

<i>Schinus terebinthifolius</i>	Invierno	Primavera	Verano	Otoño
PROFEPA (individuo 1)	3.69 ± 0.10 ^b	8.19 ± 0.08 ^a	8.96 ± 0.00 ^a	0.11 ± 0.00 ^d
PROFEPA (individuo 2)	3.82 ± 0.14 ^b	6.14 ± 0.11 ^c	0.42 ± 0.08 ^d	0.44 ± 0.07 ^b
CBTIS 130	5.48 ± 0.11 ^a	6.60 ± 0.11 ^b	6.38 ± 0.08 ^b	0.24 ± 0.00 ^c
CIIDIR	2.73 ± 0.00 ^c	3.43 ± 0.08 ^d	3.47 ± 0.08 ^c	0.61 ± 0.04 ^a

Los valores representan la media y la desviación estándar de tres análisis independientes. Diferentes letras dentro de una misma columna indican diferencias significativas ($p < 0.05$) de acuerdo a la prueba de discriminación de medias de Tukey.

Ligustrum lucidum (Tabla 14.4) acumuló más taninos en el sitio CBTIS 130 que en el sitio ITD en todas las épocas del año de acuerdo a lo siguiente: 1.29 veces más en invierno, 18.80 veces más en primavera, 19.62 veces más en verano, y 13.15 veces más en otoño.

Tabla 14.4. Concentración de taninos (mg EEC/g ES) de *Ligustrum lucidum* colectado en dos sitios (los sitios son de acuerdo a la Figura 3) en cuatro épocas del año.

<i>Ligustrum lucidum</i>	Invierno	Primavera	Verano	Otoño
ITD	0.64 ± 0.00 ^a	0.57 ± 0.00 ^a	0.50 ± 0.00 ^a	0.44 ± 0.07 ^a
CBTIS 130	0.83 ± 0.00 ^b	10.72 ± 0.00 ^b	9.81 ± 0.00 ^b	5.79 ± 0.10 ^b

Los valores representan la media y la desviación estándar de tres análisis independientes. Diferentes letras dentro de una misma columna indican diferencias significativas ($p < 0.05$) de acuerdo a la prueba de discriminación de medias de Tukey.

Las magnitudes en las variaciones de los niveles de taninos encontrados dentro de una misma especie colectada en diferentes sitios en una misma época del año fueron mayores (de 1.23 a 19.62 veces en *C. macrocarpa* en invierno y *L. lucidum*

en verano, respectivamente) que las encontradas para las variaciones en los niveles de fenoles totales, las cuales variaron de 1.19 a 6.50 veces en *S. terebinthifolius* en verano y *L. japonicum* en otoño, respectivamente.

Las variaciones estacionales de taninos dentro de una misma especie colectada en sitios de diferentes pueden estar asociadas a niveles variables de contaminación atmosférica.

6.2.1 Correlación entre contenidos de taninos condensados y niveles de contaminantes del aire

Correlaciones entre los niveles de taninos y niveles de contaminación del aire han sido reportados *Psidium guajava* por Mendes de Rezende y Furlan (2009). Los resultados de los análisis de la correlación entre la variación de contaminantes del aire y la de las concentraciones de taninos condensados foliares se muestran en las Tablas 14.5 a 14.20. Para las especies del sitio PROFEPA, la SRNyMA únicamente proporcionó los datos de concentración de partículas PM10 para las temporadas de invierno, primavera, y verano. Considerando esos valores, *S. terebinthifolius* (individuo 2) mostró la correlación más alta. Lo que indica que conforme las concentraciones de partículas PM10 aumentan, la concentración de taninos condensados lo hace de igual manera (Tabla 14.5)

Tabla 14.5. Correlación entre la variación de los niveles de partículas PM10 y la concentración de taninos condensados de tres especies encontradas en el sitio PROFEPA (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente).

Especie	Correlación	Significancia de la correlación
<i>Ligustrum japonicum</i>	-0.01363	0.99132
<i>Schinus terebinthifolius</i> (Individuo 1)	-0.53401	0.64137
<i>Schinus terebinthifolius</i> (Individuo 2)	0.94952	0.20314
<i>Cupressus macrocarpa</i>	-0.66942	0.53309

Para las especies del sitio ITD, la SRNyMA únicamente proporcionó los datos de concentración de O₃, NO_x, SO₂, CO y partículas PM10 para las temporadas de invierno, primavera, verano y otoño. Considerando esos valores, *F. retusa* y *L.*

lucidum, mostraron correlaciones altas positivas para O₃ y CO, lo que indica que conforme las concentraciones de O₃ y CO aumentan, *F. retusa* y *L. lucidum* tiende a aumentar las concentraciones de taninos condensados (Tabla 14.6 y 14.9). *C. macrocarpa*, y *L. lucidum*, mostraron correlaciones altas negativas para NO_x, SO₂, y PM10 que indica que conforme las concentraciones de NO_x, SO₂, y PM10 aumentan, *C. macrocarpa* y *L. lucidum*, tienden a acumular menores concentraciones de taninos condensados (Tabla 14.7, 14.8 y 14.10).

Tabla 14.6. Correlación entre la variación de los niveles de partículas O₃ y la concentración de taninos condensados de tres especies encontradas en el sitio ITD (Instituto Tecnológico de Durango).

Especie	Correlación	Significancia de la correlación
<i>Cupressus macrocarpa</i>	-0.97306	0.026938
<i>Ficus retusa</i>	0.97628	0.023723
<i>Ligustrum lucidum</i>	0.97739	0.022613

Tabla 14.7. Correlación entre la variación de los niveles de partículas NO_x y la concentración de taninos condensados de tres especies encontradas en el sitio ITD (Instituto Tecnológico de Durango).

Especie	Correlación	Significancia de la correlación
<i>Cupressus macrocarpa</i>	-0.16531	0.83469
<i>Ficus retusa</i>	-0.049894	0.95011
<i>Ligustrum lucidum</i>	0.13031	0.86969

Tabla 14.8. Correlación entre la variación de los niveles de partículas SO₂ y la concentración de taninos condensados de tres especies encontradas en el sitio ITD (Instituto Tecnológico de Durango).

Especie	Correlación	Significancia de la correlación
<i>Cupressus macrocarpa</i>	0.41237	0.7294
<i>Ficus retusa</i>	-0.59079	0.59763
<i>Ligustrum lucidum</i>	-0.92841	0.24235

Tabla 14.9. Correlación entre la variación de los niveles de partículas CO y la concentración de taninos condensados de tres especies encontradas en el sitio ITD (Instituto Tecnológico de Durango).

Especie	Correlación	Significancia de la correlación
<i>Cupressus macrocarpa</i>	-0.94082	0.059184
<i>Ficus retusa</i>	0.96323	0.036774
<i>Ligustrum lucidum</i>	0.94703	0.05297

Tabla 14.10. Correlación entre la variación de los niveles de partículas PM10 y la concentración de taninos condensados de tres especies encontradas en el sitio ITD (Instituto Tecnológico de Durango).

Especie	Correlación	Significancia de la correlación
<i>Cupressus macrocarpa</i>	-0.91501	0.084987
<i>Ficus retusa</i>	0.80212	0.19788
<i>Ligustrum lucidum</i>	0.8994	0.1001

Para las especies del sitio SRNyMA, la SRNyMA únicamente proporcionó los datos de concentración de SO₂, partículas PM10 y 2.5 para las temporadas de invierno, primavera, verano y otoño. Considerando esos valores, para las concentraciones de SO₂, partículas PM10 y 2.5 los individuos de *L. japonicum*, *L. ovalifolium* y *C. equisetifolia* mostraron las correlaciones más altas positivas respectivamente, lo que indica que conforme las concentraciones de SO₂, PM10 y PM 2.5 aumentan, *L. japonicum*, *L. ovalifolium* y *C. equisetifolia*, tienden a acumular concentraciones de taninos condensados (Tabla 14.11, 14.12 y 14.13).

Tabla 14.11. Correlación entre la variación de los niveles de partículas SO₂ y la concentración de taninos condensados de cinco especies encontradas en el sitio SRNyMA (Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente).

Especie	Correlación	Significancia de la correlación
<i>Ligustrum japonicum</i>	0.72571	0.27429
<i>Cupressus macrocarpa</i>	-0.57744	0.42256
<i>Casuarina equisetifolia</i>	0.093844	0.90616
<i>Pinus greggii</i>	0.083013	0.91699
<i>Ligustrum ovalifolium</i>	0.0054672	0.99453

Tabla 14.12. Correlación entre la variación de los niveles de partículas PM 10 y la concentración de taninos condensados de cinco especies encontradas en el sitio SRNyMA (Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente).

Especie	Correlación	Significancia de la correlación
<i>Ligustrum japonicum</i>	0.22427	0.77573
<i>Cupressus macrocarpa</i>	-0.017516	0.98248
<i>Casuarina equisetifolia</i>	-0.23884	0.76116
<i>Pinus greggii</i>	0.083013	0.91699
<i>Ligustrum ovalifolium</i>	0.96849	0.031506

Tabla 14.13. Correlación entre la variación de los niveles de partículas PM 2.5 y la concentración de taninos condensados de cinco especies encontradas en el sitio SRNyMA (Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente).

Especie	Correlación	Significancia de la correlación
<i>Ligustrum japonicum</i>	0.7438	0.2562
<i>Cupressus macrocarpa</i>	-0.89307	0.10693
<i>Casuarina equisetifolia</i>	0.99477	0.0052328
<i>Pinus greggii</i>	-0.80631	0.19369
<i>Ligustrum ovalifolium</i>	-0.4619	0.5381

Para las especies del sitio CBTIS 130, la SRNyMA únicamente proporcionó los datos de concentración partículas PM10 para las temporadas de invierno, primavera y verano. Considerando esos valores, los dos individuos de *L. japonicum* mostró la correlación más alta positiva, lo que indica que conforme las concentraciones de

PM10 aumentan, *L. japonicum*, tiende a acumular concentraciones de taninos condensados (Tabla 14.14).

Tabla 14.14. Correlación entre la variación de los niveles de partículas PM 10 y la concentración taninos condensados totales de tres especies encontradas en el sitio CBTIS 130 (Centro de Bachillerato Industrial y de Servicios 130).

Especie	Correlación	Significancia de la correlación
<i>Ligustrum japonicum</i>	0.97732	0.13585
<i>Schinus terebinthifolius</i>	-0.8205	0.38739
<i>Ligustrum lucidum</i>	-0.87498	0.32175

Para las especies del sitio CIIDIR, la SRNyMA proporcionó los datos de concentración partículas O₃, NO_x, SO₂, CO, PM 10 y 2.5 para las temporadas de invierno, primavera y verano. Considerando esos valores, *L. japonicum* (individuo 1) y partículas O₃ y PM10 mostraron una correlación positiva lo que indica que ambas concentraciones aumentan (Tabla 14.15 y 14.19). Para las partículas NO_x y PM 2.5 el mismo individuo 1 de *L. japonicum*, mostraron correlaciones negativas, lo que indica que conforme las concentraciones de NO_x y PM 2.5 aumentan, las concentraciones de taninos condensados disminuyen (Tabla 14.16 y 14.20), al igual que *Cupressus macrocarpa* que mostró una correlación negativa con las partículas SO₂ y CO (Tabla 14.17 y 14.18).

Tabla 14.15. Correlación entre la variación de los niveles de partículas O₃ y la concentración de taninos condensados de tres especies encontradas en el sitio CIIDIR (Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional).

Especie	Correlación	Significancia de la correlación
<i>Ligustrum japonicum</i> (Individuo 1)	0.92655	0.073454
<i>Schinus terebinthifolius</i>	-0.75181	0.24819
<i>Ligustrum japonicum</i> (Individuo 2)	0.74191	0.25809
<i>Cupressus macrocarpa</i>	-0.55885	0.44115

Tabla 14.16. Correlación entre la variación de los niveles de partículas NO_x y la concentración de taninos condensados de tres especies encontradas en el sitio CIIDIR (Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional).

Especie	Correlación	Significancia de la correlación
<i>Ligustrum japonicum</i> (Individuo 1)	-0.36988	0.63012
<i>Schinus terebinthifolius</i>	0.06532	0.93468
<i>Ligustrum japonicum</i> (Individuo 2)	-0.2245	0.7755
<i>Cupressus macrocarpa</i>	-0.065918	0.93408

Tabla 14.17. Correlación entre la variación de los niveles de partículas SO₂ y la concentración de taninos condensados de tres especies encontradas en el sitio CIIDIR (Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional).

Especie	Correlación	Significancia de la correlación
<i>Ligustrum japonicum</i> (Individuo 1)	-0.01162	0.98838
<i>Schinus terebinthifolius</i>	-0.29868	0.70132
<i>Ligustrum japonicum</i> (Individuo 2)	0.34438	0.65562
<i>Cupressus macrocarpa</i>	-0.56611	0.43389

Tabla 14.18. Correlación entre la variación de los niveles de partículas CO y la concentración de taninos condensados de tres especies encontradas en el sitio CIIDIR (Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional).

Especie	Correlación	Significancia de la correlación
<i>Ligustrum japonicum</i> (Individuo 1)	0.00827	0.99173
<i>Schinus terebinthifolius</i>	-0.33539	0.66461
<i>Ligustrum japonicum</i> (Individuo 2)	0.28462	0.71538
<i>Cupressus macrocarpa</i>	-0.54222	0.45778

Tabla 14.19. Correlación entre la variación de los niveles de partículas PM 10 y la concentración de taninos condensados de tres especies encontradas en el sitio CIIDIR (Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional).

Especie	Correlación	Significancia de la correlación
<i>Ligustrum japonicum</i> (Individuo 1)	0.64755	0.35245
<i>Schinus terebinthifolius</i>	0.05652	0.9640
<i>Ligustrum japonicum</i> (Individuo 2)	0.32372	0.67628
<i>Cupressus macrocarpa</i>	-0.32269	0.67731

Tabla 14.20. Correlación entre la variación de los niveles de partículas PM 2.5 y la concentración de taninos condensados de tres especies encontradas en el sitio CIIDIR (Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional).

Especie	Correlación	Significancia de la correlación
<i>Ligustrum japonicum</i> (Individuo 1)	-0.35938	0.64062
<i>Schinus terebinthifolius</i>	0.03378	0.96622
<i>Ligustrum japonicum</i> (Individuo 2)	-0.10267	0.89733
<i>Cupressus macrocarpa</i>	-0.18003	0.81997

Una de las correlaciones más altas encontradas entre las concentraciones de partículas en el aire y las concentraciones de taninos condensados totales fue para *Cupressus macrocarpa* del sitio ITD con O₃ (-0.9730 tabla 14.6) y para *Ligustrum lucidum* del sitio ITD con SO₂ (-0.9284 tabla 14.8) que coincide con resultados de estudios similares como el de Robles *et al.* (2003), donde para *Pinus halepensis* reporta correlaciones negativas entre SO₂ y la concentración de fenoles totales ($r = -0.387$, $P < 0.05$) y para O₃ ($r = -0.625$, $P < 0.01$) lo que corresponde a que conforme aumentan los niveles de SO₂ y O₃, los niveles de taninos condensados disminuyen.

6.3 Composición fenólica

Campos y Markham (2007) desarrollaron una teoría UV para flavonoides y ácidos fenólicos, por la cual se puede obtener importante información estructural de esos compuestos a partir de los espectros de absorción UV registrados en línea a partir del DAD. Entre la información que se puede obtener de los espectros UV está la $\lambda_{\max}$ de las bandas I y II de los espectros, la cual permite discriminar entre flavonas y flavonoles 3-O-glicósidos. Otro aspecto que los espectros UV permiten detectar es la ausencia de una sustitución en el anillo B o la presencia de un anillo B 4'-oxigenado, porque la banda II del espectro UV tiene solo un pico, como en los espectros de baicaleina, apigenina y los canferol-3-O-glicósidos. La presencia de una oxigenación adicional en el anillo B produce una doble banda II (IIa y IIb), como en los espectros de luteolina y quercetina-3-O-glicósidos.

Si la banda IIa es más intensa que la IIb, entonces eso indica un compuesto con una sustitución en C6 y C8 del anillo A, como en los espectros de isoorientina y neocarlinosido; o en 3' del anillo B.

Si los espectros empatan uno con el otro pero tienen diferentes tiempos de retención (RT), entonces las diferencias se deben al número o tipo de glicósidos unidos a la estructura básica del flavonoide.

Si los espectros muestran una inflexión ("shoulder" inglés, comúnmente referido en los datos espectrales de flavonoides como "sh") entre 280 y 310 nm, entonces un 7-OH libre probablemente está presente, como en los espectros de luteolina, tricetina, canferol-3-O-ramnósido, herbacetina-3-O-glucósil-8-O-glucurónido, y quercetina-3-O-galactósido, entre otros; pero si esta inflexión no aparece, entonces una 7-O-glicosidación estará presente, como en los espectros de apigenina-7-O-glucósido, canferol-3,7-O-diglucósido, y quercetina-7-O-glucósido, entre otros.

Debido a lo anterior es que cada tipo de flavonoide muestre espectros UV típicos. Por ejemplo, canferol-3-O-glucósido, canferol-3-O-ramnósido, canferol-3-O-[glucosil(1-2)glucósido, y canferol-3-O-[ramnosil(1-6)glucósido], entre otros derivados de canferol, glicosados en la posición 3, independientemente del glicósido que tengan unido, tienen espectros UV muy similares, todos mostrando $\lambda_{\max}$ de

banda I entre 262 y 266, $\lambda_{\max}$ de banda II entre 342 y 350 nm, y una inflexión entre 280 y 310 nm.

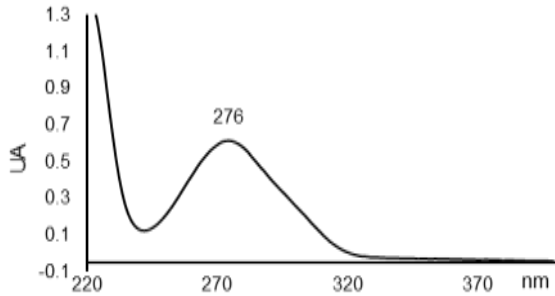
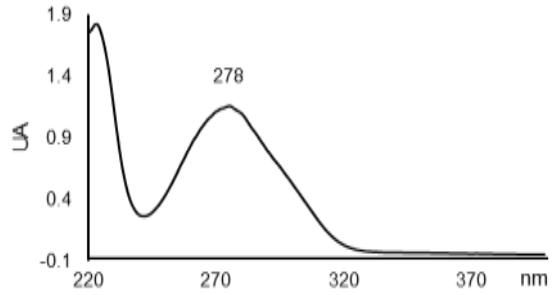
Otro ejemplo, canferol-3,7-*O*-diglucósido, canferol-3-*O*-[glucosil(1-2)glucósido]-7-*O*-glucósido, canferol-3-*O*-glucósido-7-*O*-ramnósido, canferol-3-*O*-[6-acetilglucósido]-7-*O*-glucósido, y canferol-3-*O*-[acetilglucósido]-7-*O*-ramnósido, entre otros derivados de canferol, glicosados en las posiciones 3 y 7, independientemente de los glicósidos que tengan unidos, tienen espectros UV muy similares, todos mostrando $\lambda_{\max}$ de banda I entre 263 y 265, $\lambda_{\max}$ de banda II entre 344 y 346 nm, y careciendo de la inflexión entre 280 y 310 nm, la cual es típica de los flavonoles con 7-OH libre.

Un ejemplo más, en este caso de flavonas. La apigenina-7-*O*-[ramnosil(1-2)glucósido], apigenina-7-*O*-[apiosil(1-2)glucósido], apigenina-7-*O*-glucósido, apigenina-7-*O*-neohesperidósido y otros derivados de apigenina que tienen en común una sustitución 7-*O*-glicosil, independientemente del glicósido particular que tengan unido, tienen espectros UV muy similares, todos mostrando $\lambda_{\max}$ de banda I alrededor de 335 nm, y $\lambda_{\max}$ de banda II alrededor de 267 nm. Mientras que la luteolina-7-*O*-glucósido, luteolina-7-*O*-rutinosido, luteolina-7-*O*-[glucuronosil(1-2)glucurónido], y otros derivados de luteolina que tienen en común una sustitución 7-*O*-glicosil, independientemente del particular glicosil unido, muestran espectros muy similares, todos teniendo $\lambda_{\max}$ de banda I alrededor de 347 nm, $\lambda_{\max}$ de banda IIa alrededor de 267 nm (llamada inflexión), y $\lambda_{\max}$ de banda IIb alrededor de 254 nm. Esta valiosa información estructural se puede obtener incluso sin el uso de reactivos de diagnóstico que causan desviaciones en los máximos de absorción UV, como el AlCl_3 y el metóxido de sodio, entre otros. Algunos aspectos que no se pueden conocer a partir de los espectros UV obtenidos por DAD es el particular sustituyente glicosil unido a los compuestos resueltos en los cromatogramas, ni el tipo particular de enlace (α , β , o en el caso de disacáridos, si los enlaces son 1-6, 1-2, u otro). Por esta razón, en el presente trabajo se hace referencia a los compuestos flavonoides encontrados como canferol-3-*O*-glicósido, quercetina-3-*O*-glicósido, canferol-3,7-*O*-diglicósido, o quercetina-3,7-*O*-diglicósido.

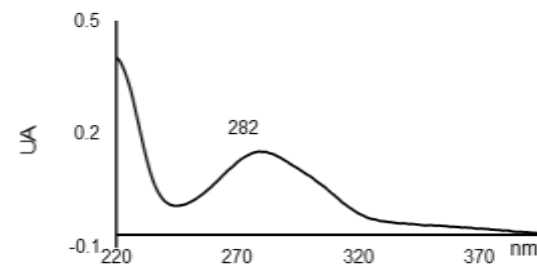
Con base en esos tipos de datos espectrales fue que se determinó el tipo de flavonol al que pertenecían algunos de los compuestos que se reportan en el presente trabajo.

En la Tabla 15 se muestran los TR, espectros UV con $\lambda_{\max}$, y las muestras en las que se encontraron los diferentes compuestos fenólicos foliares. Se encontró un total de 56 compuestos. De entre ellos, 28 fueron ácidos fenólicos (**1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 14, 16, 18, 19, 20, 21, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 31, 35, 36, 38, 42, 44, 45, y 51**) y 28 fueron flavonoides (**7, 10, 11, 12, 13, 15, 17, 22, 24, 30, 32, 33, 34, 37, 39, 40, 41, 43, 46, 47, 48, 49, 50, 52, 53, 54, 55, y 56**). Dentro de los flavonoides, 21 fueron flavonas y siete fueron flavonoles. Dentro de las flavonas, cuatro fueron derivados glicósidos de luteolina (**11, 17, 46, y 52**) y uno fue derivado glicósido de apigenina (**41**). Dentro de los flavonoles, tres fueron derivados 3-O-glicósidos de quercetina (**7, 24 y 33**), uno fue derivado 3-O-glicósido de miricetina (**48**), y tres fueron derivados 3-O-glicósidos de herbacetina (**37, 39, y 55**).

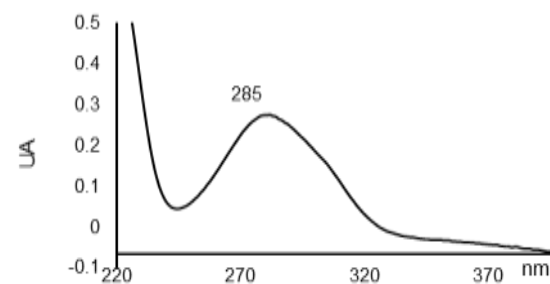
Tabla 15. Compuestos fenólicos encontrados en las hojas de 7 especies urbanas de plantas de la ciudad de Durango, México.

Número de compuesto	Tiempo de Retención	Nombre propuesto de compuesto fenólico	Especie	Sitio de colecta	Espectro
1	18.979 ± 1.273	Ácido fenólico	<i>Schinus terebinthifolius</i>	PROFEPA CBTIS 130 CIIDIR	
2	20.483 ± 0.699	Ácido fenólico	<i>Schinus terebinthifolius</i>	PROFEPA CBTIS 130 CIIDIR	

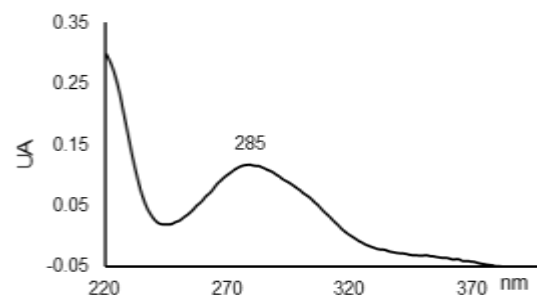
3 30.807 ± 0.467 Ácido fenólico *Schinus terebinthifolius* PROFEPA
CBTIS 130
CIIDIR



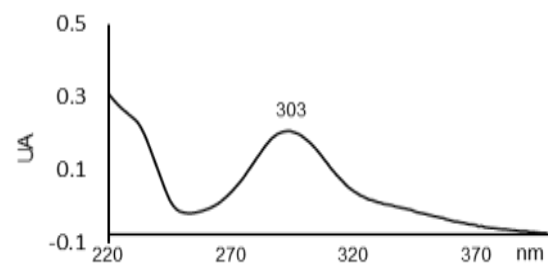
4 31.643 ± 0.306 Ácido fenólico *Schinus terebinthifolius* PROFEPACBTIS
130 CIIDIR



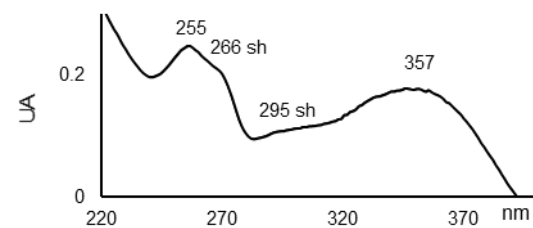
5 32.384 ± 0.253 Ácido fenólico *Schinus terebinthifolius* PROFEPA
CBTIS 130
CIIDIR



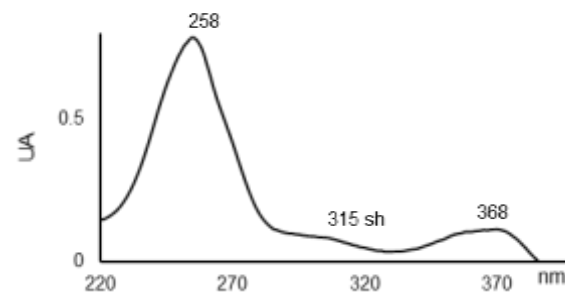
6 33.315 ± 0.924 Ácido fenólico *Cupressus macrocarpa* PROFEPA
SRNyMA ITD
CIIDIR

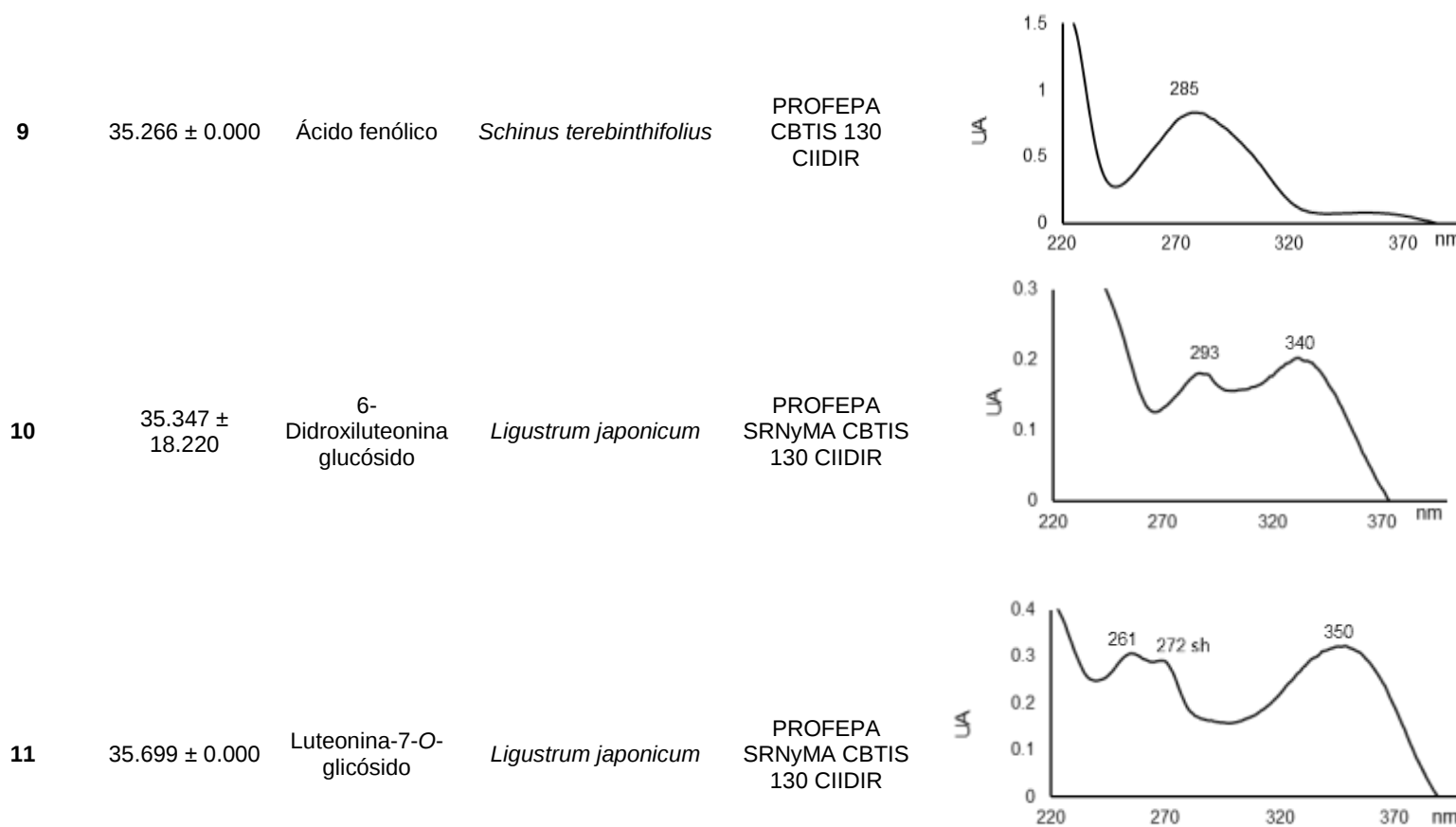


7 34.496 ± 0.436 Quercetina-3-O-
glicósido *Ligustrum ovalifolium* SRNyMA

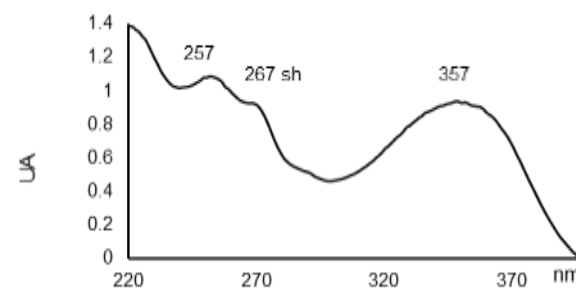


8 35.093 ± 0.038 Derivado de
ácido elágico *Casuarina equisetifolia* SRNyMA

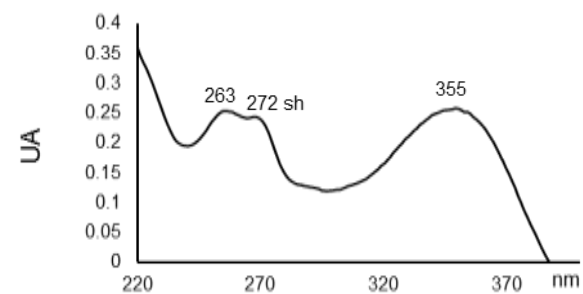




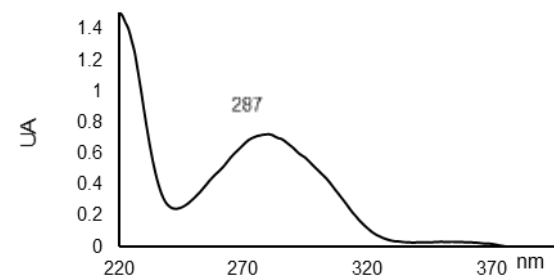
12 35.816 ± 0.000 Luteonina-7-O-glicósido *Ligustrum ovalifolium* SRNyMA



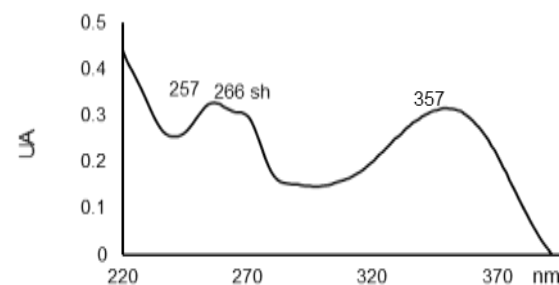
13 35.926 ± 0.360 Luteonina-7-O-glicósido *Ligustrum lucidum* ITD CBTIS 130



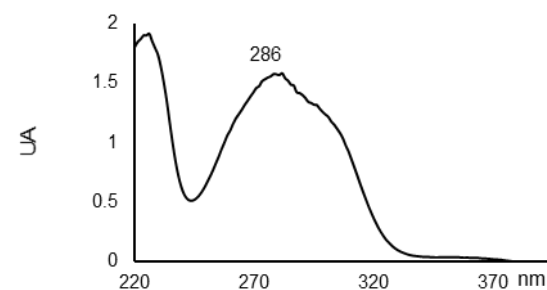
14 35.999 ± 0.360 Ácido fenólico *Schinus terebinthifolius* PROFEP
CBTIS 130
CIIDIR



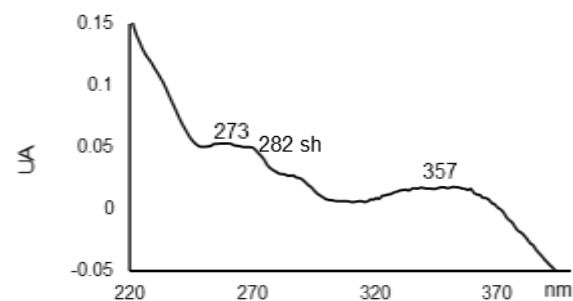
15 36.117 ± 0.478 Luteonina-7-O-
glicósido *Ligustrum japonicum* ITD CBTIS 130



16 36.241 ± 0.000 Ácido fenólico *Schinus terebinthifolius* PROFEP
CBTIS 130
CIIDIR



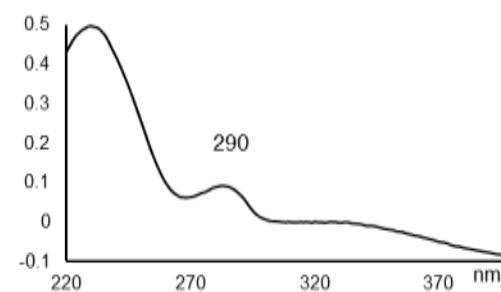
17 36.373 ± 0.777 Posible derivado
de luteonina *Pinus greggii* SRNyMA



18 36.505 ± 0.000 Ácido fenólico *Ligustrum ovalifolium*

SRNyMA

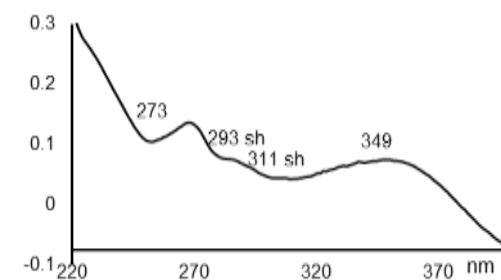
UA



19 36.698 ± 0.0360 Derivado de herbacetina glicósido *Pinus greggii*

SRNyMA

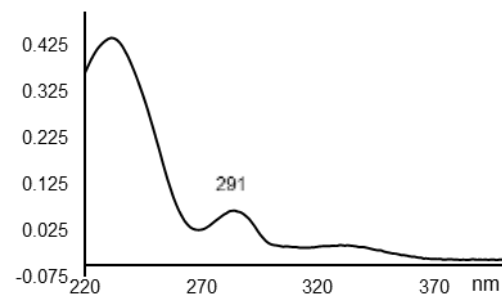
UA



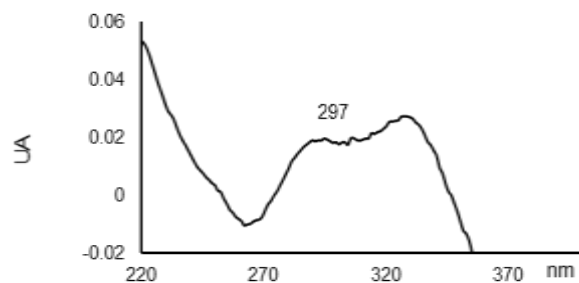
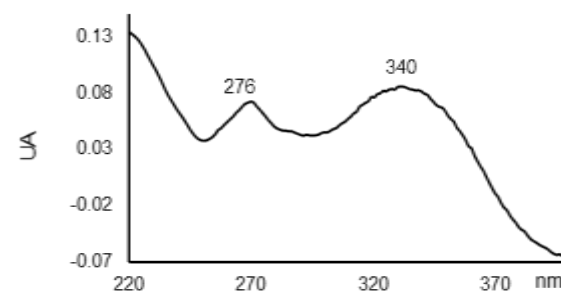
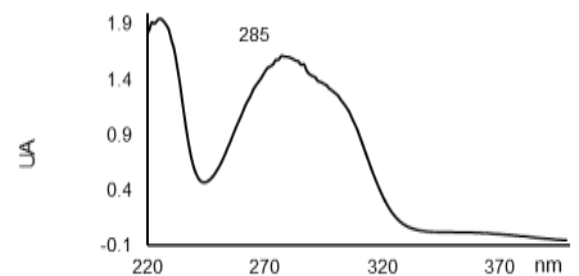
20 36.843 ± 0.000 Ácido fenólico *Ligustrum ovalifolium*

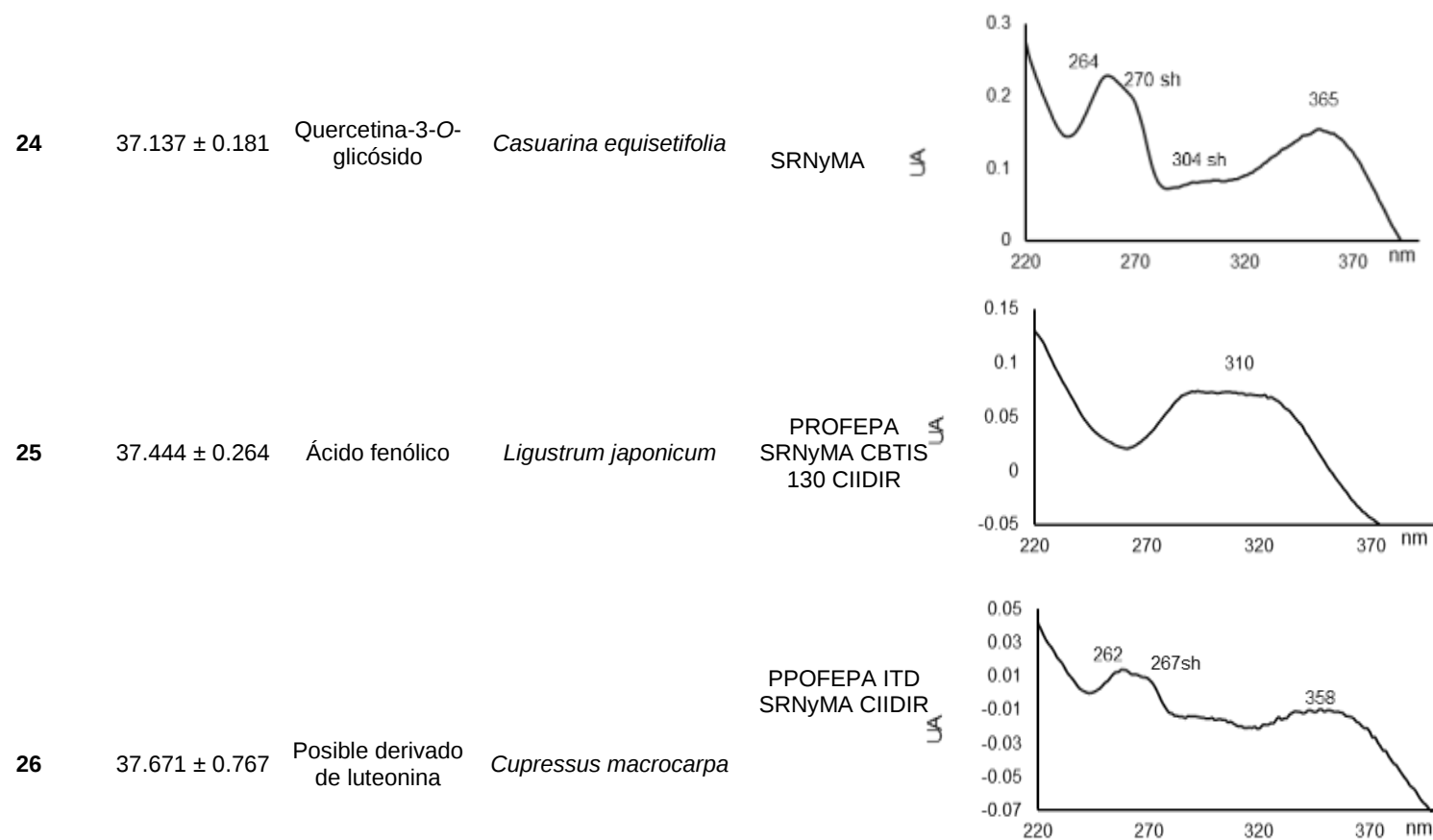
SRNyMA

UA

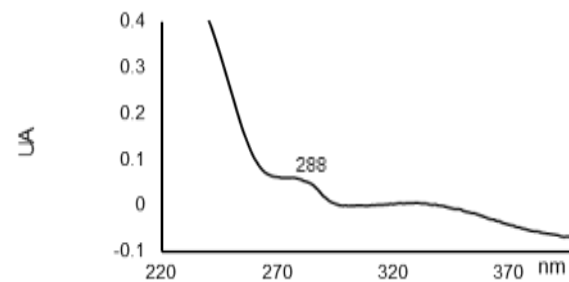


21	36.901 ± 0.000	Ácido fenólico	<i>Ligustrum ovalifolium</i>	SRNyMA
22	37.048 ± 0.000	Apigenina-7-O-glicósido	<i>Ligustrum japonicum</i>	PROFEPA SRNyMA CBTIS 130 CIIDIR
23	37.07 ± 0.2316	Ácido fenólico	<i>Ligustrum japonicum</i>	PROFEPA SRNyMA CBTIS 130 CIIDIR

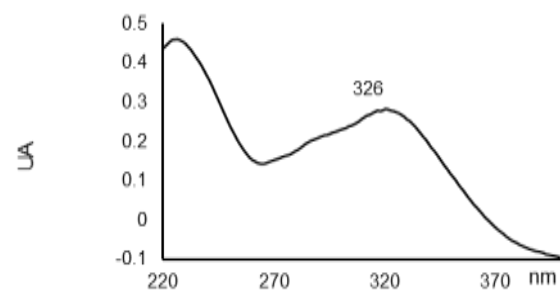




27 38.199 ± 0.356 Posible derivado
de ácido
fenólico *Ligustrum japonicum* PROFEPA
SRNyMA CBTIS
130 CIIDIR

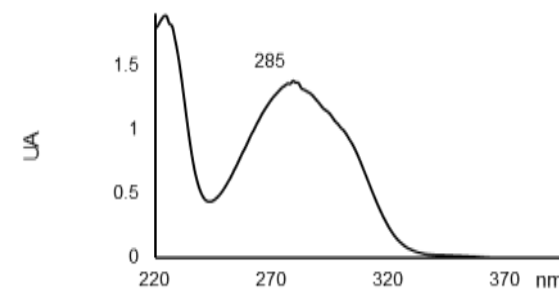


28 38.221 ± 0.395 Ácido fenólico *Ligustrum ovalifolium* SRNyMA

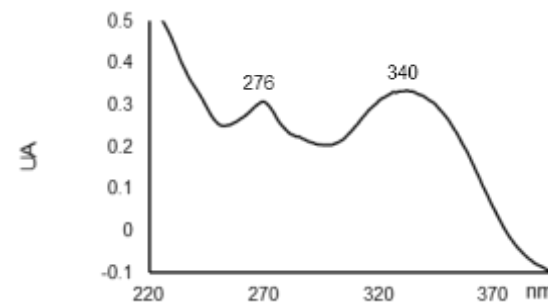


29 38.375 ± 0.000 Ácido fenólico *Schinus terebinthifolius*

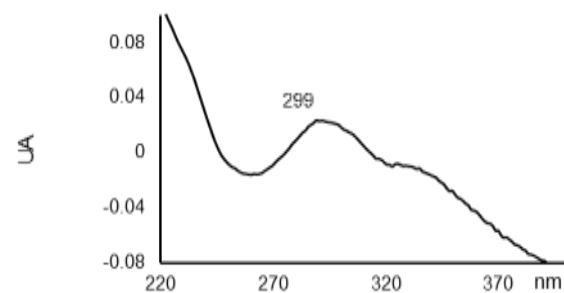
PROFEPA
CBTIS 130
CIIDIR



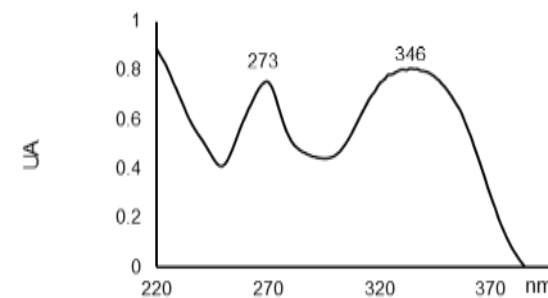
30 38.617 ± 0.498 Apigenina-7-O-
glicósido *Ligustrum ovalifolium* SRNyMA



31 38.625 ± 0.000 Ácido fenólico *Cupressus macrocarpa* PROFEPA ITD
SRNyMA CIIDIR

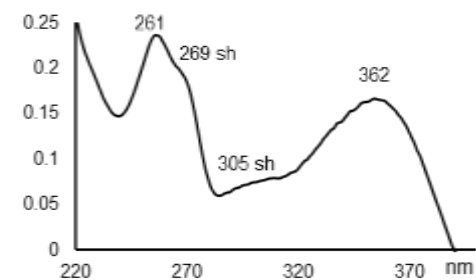


32 39.947 ± 0.487 Apigenina-7-O-
glicósido *Ligustrum lucidum* ITD CBTIS 130



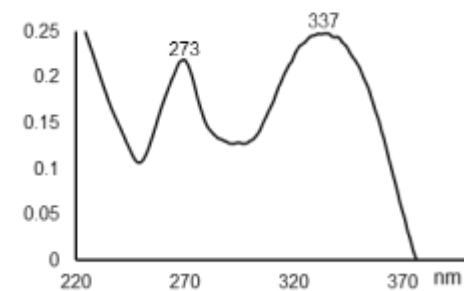
33 38.955 ± 0.062 Quercetina-3-O-glicósido *Pinus greggii* SRNyMA

S



34 39.050 ± 1.297 Apigenina-7-O-glicósido *Ligustrum japonicum* PROFEPA
SRNyMA CBTIS
130 CIIDIR

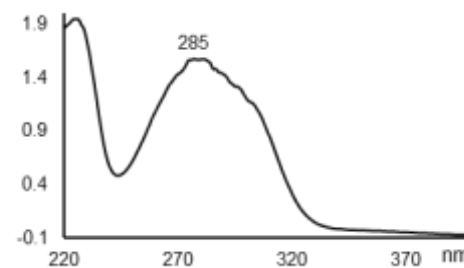
S



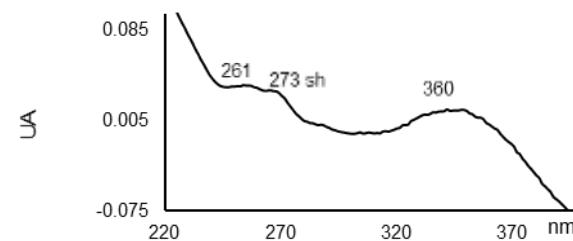
35 39.057 ± 0.000 Ácido fenólico *Schinus terebinthifolius*

PROFEPA
CBTIS 130
CIIDIR

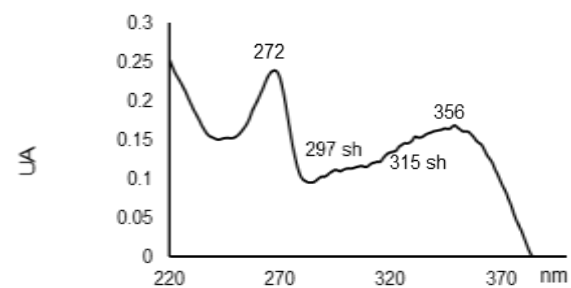
S



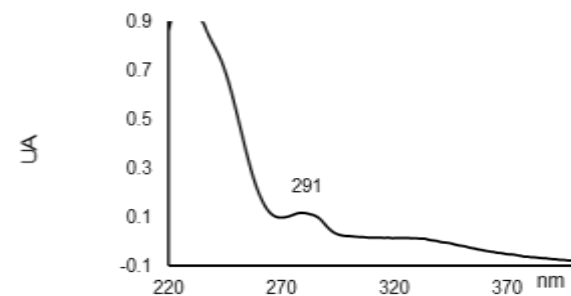
36 39.072 ± 0.000 Posible derivado
de luteonina *Cupressus macrocarpa* PROFEPA ITD
SRNyMA CIIDIR



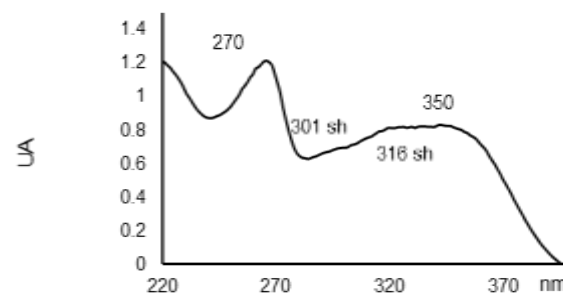
37 39.101 ± 0.089 Herbacitina-3-O-
glicósido *Casuarina equisetifolia* SRNyMA



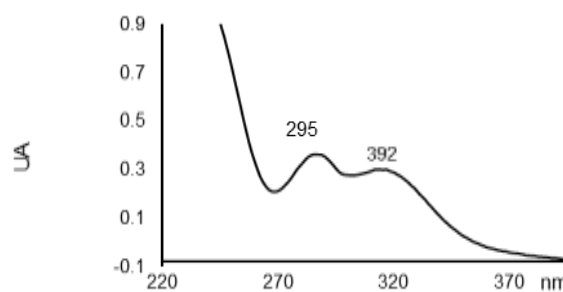
38 39.754 ± 0.249 Ácido fenólico *Ligustrum ovalifolium* SRNyMA



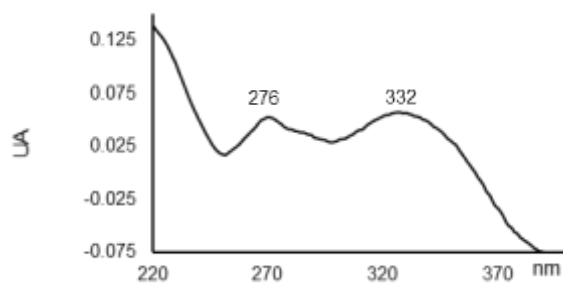
39 40.817 ± 0.114 Herbacitina-3-O-
glicósido *Casuarina equisetifolia* SRNyMA



40 40.993 ± 0.285 Apigenina-7-O-
glicósido *Ligustrum ovalifolium* SRNyMA

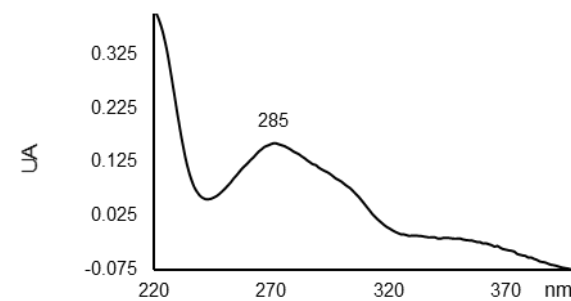


41 42.049 ± 0.266 Derivado de
apigenina *Ligustrum lucidum* ITD CBTIS 130



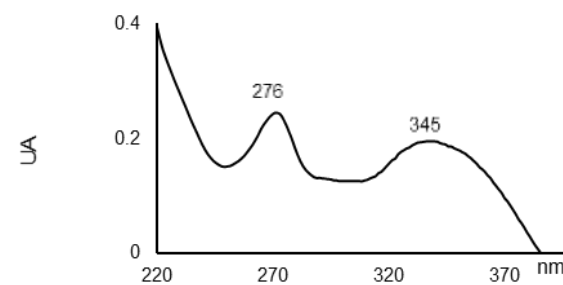
42 42.401 $\pm$ 0.009 Ácido fenólico *Schinus terebinthifolius*

PROFEPA
CBTIS 130
CIIDIR



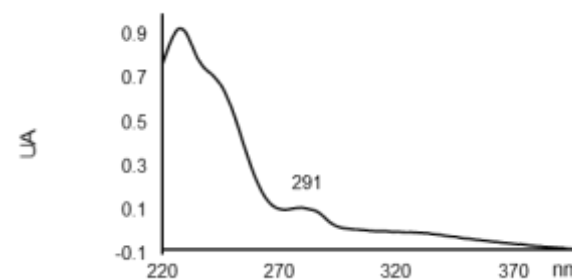
43 42.423 $\pm$ 0.062 Apigenina-7-O-glicósido *Ligustrum ovalifolium*

SRNyMA

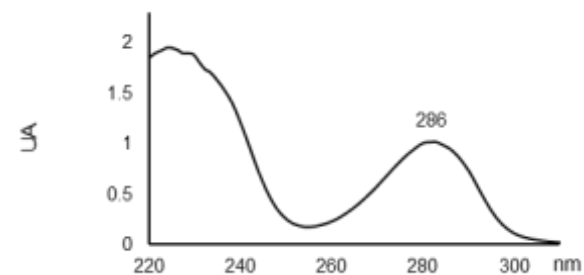


44 44.11 $\pm$ 0.171 Ácido fenólico *Ligustrum ovalifolium*

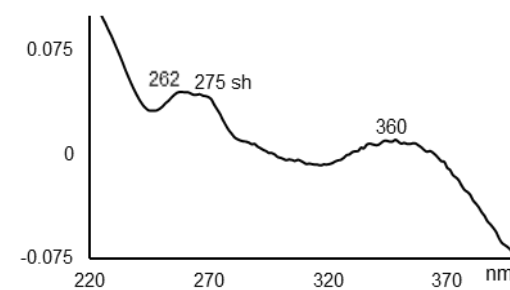
SRNyMA



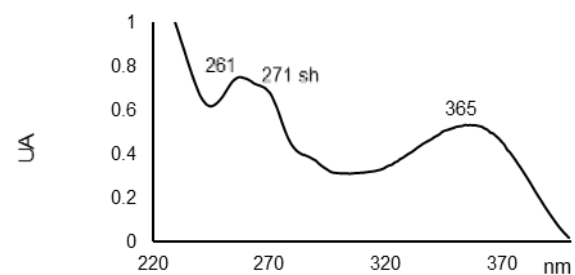
45 48.583 ± 0.000 Ácido fenólico *Ligustrum lucidum* ITD CBTIS 130



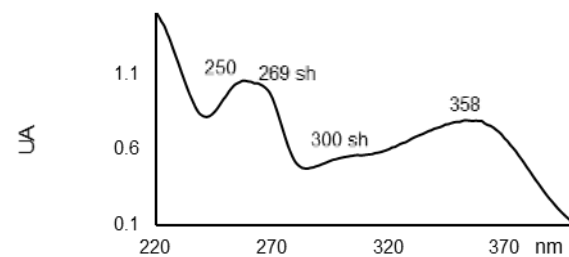
46 48.913 ± 0.084 Posible derivado de luteonina *Cupressus macrocarpa* PROFEPA ITD SRNyMA CIIDIR



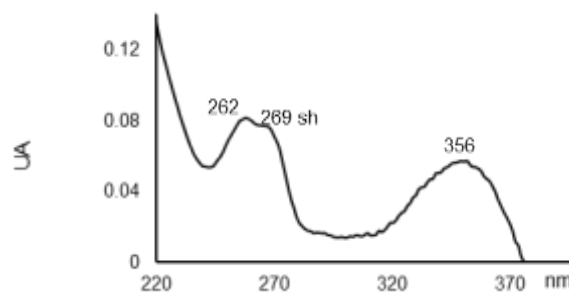
47 49.097 ± 0.000 Luteonina-7-O-glicósido *Ligustrum lucidum* ITD CBTIS 130



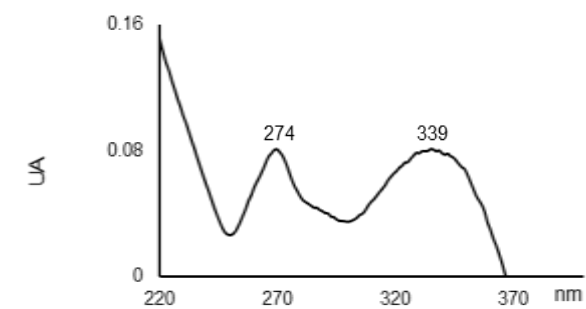
48 49.104 ± 0.113 Mirecitina-3-O-
glicósido *Schinus terebinthifolius* PROFEPA
CBTIS 130
CIIDIR



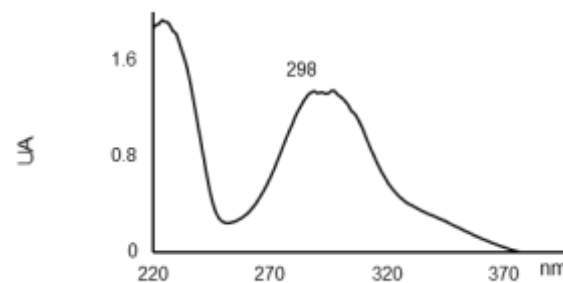
49 49.302 ± 0.112 Posible derivado
de luteonina *Cupressus macrocarpa* PROFEPA ITD
SRNyMA CIIDIR



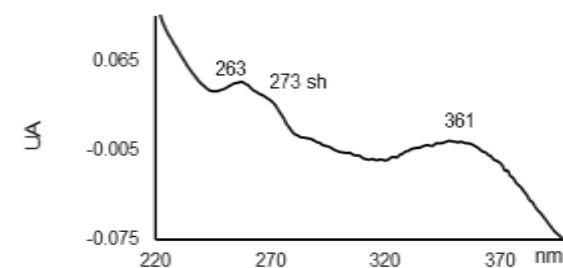
50 49.735 ± 0.026 Apigenina-7-O-
glicósido *Cupressus macrocarpa* PROFEPA ITD
SRNyMA CIIDIR



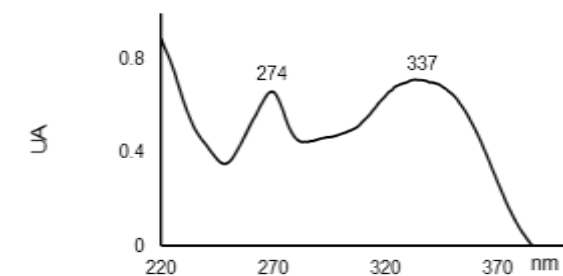
51 50.534 ± 0.000 Ácido fenólico *Ligustrum lucidum* ITD CBTIS 130



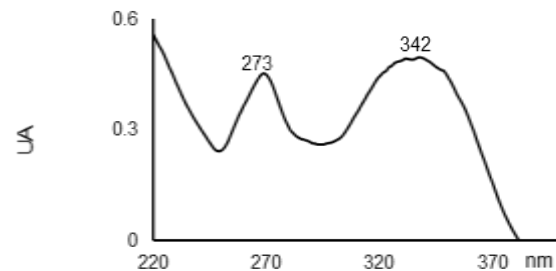
52 51.216 ± 0.269 Posible derivado de luteonina *Cupressus macrocarpa* PROFEPA ITD SRNyMA CIIDIR



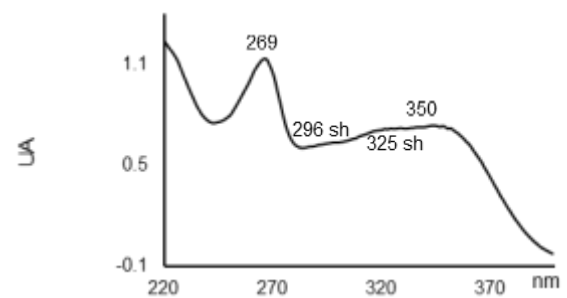
53 51.561 ± 0.516 Apigenina-7-O-glicósido *Ligustrum lucidum* ITD CBTIS 130



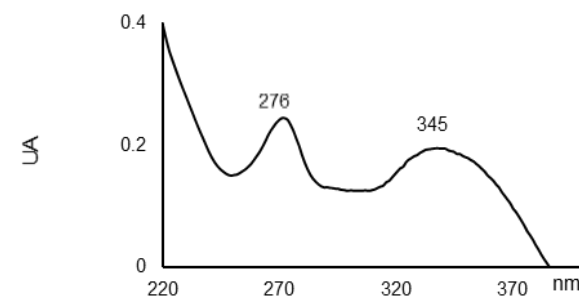
54 52.045 ± 0.659 Apigenina-7-O-glicósido *Cupressus macrocarpa* PROFEPA ITD
SRNyMA CIIDIR



55 54.985 ± 0.108 Herbacetina-3-O-glicósido *Schinus terebinthifolius* PROFEPA
CBTIS 130
CIIDIR



56 55.176 ± 0.591 Apigenina-7-O-glicósido *Pinus greggii* SRNyMA



Los valores de tiempo de retención representan la media y desviación estándar de al menos tres repeticiones.

Los perfiles fenólicos fueron típicos para cada especie, corroborando lo reportado por varios autores acerca de la tendencia especie-específica de los perfiles fenólicos (Almaraz-Abarca *et al.*, 2006b; Almaraz-Abarca *et al.*, 2013a, 2013b; Medina-Medrano *et al.*, 2015). Ejemplos de los cromatogramas obtenidos por HPLC-DAD, representando los perfiles fenólicos foliares de cada especie analizada se presentan en el Anexo 1.

La concentración individual de cada uno de los compuestos fenólicos resueltos en los cromatogramas de cada especie analizada en cuatro épocas del año se presenta en la Tabla 16. Las concentraciones individuales, dentro de una misma especie y sitio, variaron dentro de un intervalo muy amplio de estación a estación, sin mostrar una tendencia general. Algunos compuestos como **3** y **5** de *S. terebinthifolius*, **8** de *C. equisetifolia* de SRNyMA, y **10** de *L. japonicum* de PROFEPA, disminuyeron su concentración en verano. Sin embargo, otros como **1** y **2** de *S. terebinthifolius* de PROFEPA, **13** de *L. lucidum* de CBTIS 130, y **15** de *L. japonicum* de PROFEPA aumentaron su concentración en verano. Resultados similares, en los que no se observó una tendencia general, fueron reportados por Raal *et al.* (2015) para cinco especies de *Betula*.

Tabla 16. Concentración individual en unidades arbitrarias de los compuestos fenólicos resueltos

Especie	Número de compuesto	Sitio	Muestreo 1 (Invierno)	Muestro 2 (Primavera)	Muestro 3 (Verano)	Muestro 4 (Otoño)
			Unidades arbitrarias de concentración			
<i>Schinus terebinthifolius</i>	1	PROFEPA	38065.14	34686.40	45520.62	33978.00
<i>Schinus terebinthifolius</i>	2	PROFEPA	1297.93	10784.01	1504.01	60022.03
<i>Schinus terebinthifolius</i>	3	PROFEPA	12864.47	3402.08	360.76	2525.92
<i>Schinus terebinthifolius</i>	4	PROFEPA	3056.95	2466.93	30705.29	5807.79
<i>Schinus terebinthifolius</i>	5	PROFEPA	3056.95	2466.93	1753.94	1753.94
<i>Cupressus macrocarpa</i>	6	PROFEPA	280.44	357.86	353.07	311.76
<i>Ligustrum ovalifolium</i>	7	SRNyMA	538.85	1114.29	1202.40	7.24
<i>Casuarina equisetifolia</i>	8	SRNyMA	24456.73	23322.86	5912.00	6190.26
<i>Schinus terebinthifolius</i>	9	PROFEPA	NE	NE	NE	25169.95
<i>Ligustrum japonicum</i>	10	PROFEPA	3325.13	1460.12	1290.37	1611.45
<i>Ligustrum japonicum</i>	11	PROFEPA	NE	NE	NE	279.54
<i>Ligustrum ovalifolium</i>	12	SRNyMA	NE	NE	NE	4293.57
<i>Ligustrum lucidum</i>	13	CBTIS 130	197.89	149.10	320.21	2437.08
<i>Schinus terebinthifolius</i>	14	PROFEPA	NE	NE	30705.29	NE
<i>Ligustrum japonicum</i>	15	PROFEPA	24.90	249.80	440.16	178.25
<i>Schinus terebinthifolius</i>	16	PROFEPA	NE	NE	NE	32758.26
<i>Pinus greggii</i>	17	SRNyMA	NE	NE	NE	360.95
<i>Ligustrum ovalifolium</i>	18	SRNyMA	NE	NE	2701.99	NE
<i>Pinus greggii</i>	19	SRNyMA	NE	NE	117.45	NE
<i>Ligustrum ovalifolium</i>	20	SRNyMA	NE	NE	2927.00	NE
<i>Schinus terebinthifolius</i>	21	PROFEPA	NE	NE	42016.98	NE
<i>Ligustrum japonicum</i>	22	PROFEPA	NE	NE	NE	594.37
<i>Ligustrum japonicum</i>	23	PROFEPA	NE	84.19	423.33	NE
<i>Casuarina equisetifolia</i>	24	SRNyMA	NE	NE	488.01	783.99
<i>Ligustrum japonicum</i>	25	PROFEPA	NE	NE	423.33	228.47
<i>Cupressus macrocarpa</i>	26	PROFEPA	NE	NE	89.50	NE
<i>Ligustrum japonicum</i>	27	PROFEPA	NE	1316.27	875.66	1198.48
<i>Ligustrum ovalifolium</i>	28	SRNyMA	NE	NE	0.33	1735.39
<i>Schinus terebinthifolius</i>	29	SRNyMA	NE	NE	NE	18874.07
<i>Ligustrum ovalifolium</i>	30	SRNyMA	NE	NE	1.05	967.92
<i>Cupressus macrocarpa</i>	31	SRNyMA	NE	NE	193.49	NE
<i>Ligustrum lucidum</i>	32	CBTIS 130	NE	NE	120.82	3001.11
<i>Pinus greggii</i>	33	SRNyMA	NE	NE	117.45	1294.57
<i>Ligustrum japonicum</i>	34	PROFEPA	NE	929.23	1484.90	594.37
<i>Schinus terebinthifolius</i>	35	PROFEPA	NE	NE	1484.90	NE
<i>Cupressus macrocarpa</i>	36	PROFEPA	NE	NE	NE	109.09
<i>Casuarina equisetifolia</i>	37	SRNyMA	NE	NE	NE	1114.81

<i>Ligustrum ovalifolium</i>	38	SRNyMA	NE	NE	11842.49	6407.22
<i>Casuarina equisetifolia</i>	39	SRNyMA	NE	NE	52.95	6244.82
<i>Ligustrum ovalifolium</i>	40	SRNyMA	NE	NE	2860.03	4960.33
<i>Ligustrum lucidum</i>	41	CBTIS 130	NE	NE	384.43	4114.90
<i>Schinus terebinthifolius</i>	42	PROFEPA	NE	NE	14514.31	2362.32
<i>Pinus greggii</i>	43	SRNyMA	NE	NE	295.26	295.26
<i>Ligustrum ovalifolium</i>	44	SRNyMA	NE	NE	5207.17	4114.56
<i>Ligustrum lucidum</i>	45	ITD	2068.40	NE	NE	NE
<i>Cupressus macrocarpa</i>	46	SRNyMA	227.56	NE	NE	NE
<i>Ligustrum lucidum</i>	47	ITD	331.90	NE	NE	NE
<i>Schinus terebinthifolius</i>	48	PROFEPA	5158.16	2564.18	NE	NE
<i>Cupressus macrocarpa</i>	49	SRNyMA	149.71	NE	NE	NE
<i>Cupressus macrocarpa</i>	50	SRNyMA	0.26	260.19	NE	NE
<i>Ligustrum lucidum</i>	51	ITD	1902.62	NE	NE	NE
<i>Cupressus macrocarpa</i>	52	SRNyMA	251.94	608.98	NE	NE
<i>Ligustrum lucidum</i>	53	CBTIS 130	NE	686.17	7.09	2356.89
<i>Cupressus macrocarpa</i>	54	SRNyMA	NE	1006.00	13.70	972.87
<i>Schinus terebinthifolius</i>	55	PROFEPA	4580.01	12641.17	NE	NE
<i>Pinus greggii</i>	56	SRNyMA	825.27	495.71	NE	NE

El número de los compuestos corresponde a los de a Tabla 14.

NE: No encontrado.

6.3.1 Pruebas de correlación entre unidades arbitrarias de concentración de los compuestos fenólicos y niveles de contaminantes del aire

La correlación se realizó considerando los datos de calidad del aire proporcionados por la SRNyMA y la concentración de los compuestos encontrados por especie (*Schinus terebinthifolius*, *Cupressus macrocarpa*, *Ligustrum japonicum*, *Ligustrum ovalifolium*, *Casuarina equisetifolia*, *Ligustrum lucidum*), temporada (invierno, primavera, verano, y otoño), y sitio. El análisis se hizo solo para seis especies debido a que fueron las que tuvieron presencia de compuestos para las mismas fechas de monitoreo de calidad del aire (Tablas 17 a 17.4).

Para las especies del sitio PROFEPA, la SRNyMA únicamente proporcionó los datos de concentración de partículas PM10 para las temporadas de invierno, primavera, y verano. Considerando esos valores, los compuestos **1** y **4** de *S. terebinthifolius* mostraron las correlaciones más altas. Éstas fueron negativas, lo

que indica que conforme las concentraciones de PM10 aumentan, *S. terebinthifolius* tiende a acumular unidades menores arbitrarias de concentración de compuestos fenoles totales foliares (Tabla 17).

Tabla 17. Correlación entre las unidades arbitrarias de concentración de compuestos y variación de los niveles de partículas PM 10 de tres especies encontradas en el sitio PROFEPA (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente).

Número de compuesto	Especie	Correlación	Significancia de la correlación
1	<i>Schinus terebinthifolius</i>	-0.97724	0.13607
2	<i>Schinus terebinthifolius</i>	0.56506	0.6177
3	<i>Schinus terebinthifolius</i>	0.61551	0.5779
4	<i>Schinus terebinthifolius</i>	-0.99699	0.04943
5	<i>Schinus terebinthifolius</i>	0.84454	0.35975
6	<i>Cupressus macrocarpa</i>	-0.36388	0.7629
10	<i>Ligustrum japonicum</i>	0.48199	0.67983
15	<i>Ligustrum japonicum</i>	-0.78536	0.42495

Para las especies del sitio SRNyMA, la SRNyMA únicamente proporcionó los datos de concentración de SO₂, partículas PM10 y 2.5 para las temporadas de invierno, primavera, verano y otoño. Considerando esos valores, para las concentraciones de SO₂, el compuesto 54 de *C. macrocarpa* mostró una correlación positiva más alta, lo que indica que conforme las concentraciones de partículas SO₂ aumentan, las concentraciones de unidades arbitrarias de concentración del compuesto 54 lo hace también (Tabla 17.1). Los compuestos 7 y 8 de *L. ovalifolium* y *C. equisetifolia* respectivamente, mostraron correlaciones altas aunque negativas lo que indica que conforme aumentan las concentraciones de PM 10 y 2.5 las unidades arbitrarias de concentración disminuyen (Tabla 17.2 y 17.3).

Tabla 17.1. Correlación entre la variación de los niveles de partículas SO₂ y las unidades arbitrarias de concentración de compuestos de tres especies encontradas en el sitio SRNyMA (Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente).

Número de compuesto	Especie	Correlación	Significancia de la correlación
7	<i>Ligustrum ovalifolium</i>	-0.7475	0.2525
8	<i>Casuarina equisetifolia</i>	0.2003	0.79962
54	<i>Cupressus macrocarpa</i>	0.9522	0.19763

Tabla 17.2. Correlación entre la variación de los niveles de partículas de PM₁₀ y las unidades arbitrarias de concentración de compuestos de tres especies encontradas en el sitio SRNyMA (Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente).

Número de compuesto	Especie	Correlación	Significancia de la correlación
7	<i>Ligustrum ovalifolium</i>	-0.5292	0.4708
8	<i>Casuarina equisetifolia</i>	0.36861	0.63139
54	<i>Cupressus macrocarpa</i>	0.20882	0.86608

Tabla 17.3. Correlación entre la variación de los niveles de partículas PM 2.5 y las unidades arbitrarias de concentración de compuestos de tres especies encontradas en el sitio SRNyMA (Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente).

Número de compuesto	Especie	Correlación	Significancia de la correlación
7	<i>Ligustrum ovalifolium</i>	-0.51407	0.48593
8	<i>Casuarina equisetifolia</i>	-0.92475	0.075251
54	<i>Cupressus macrocarpa</i>	-0.08071	0.94856

Para las especies del sitio CBTIS 130, la SRNyMA únicamente proporcionó los datos de concentración de partículas PM₁₀ para las temporadas de invierno, primavera, y verano. Considerando esos valores, el compuesto **13** de *L. lucidum* mostró una correlación positiva, lo que indica que conforme las concentraciones de PM₁₀ aumentan, el compuesto **13** de *L. lucidum*, tiende a acumular unidades arbitrarias de concentración (Tabla 17.4).

Tabla 17.4. Correlación entre la variación de los niveles de partículas PM 2.5 y las unidades arbitrarias de concentración de compuestos de tres especies encontradas en el sitio CBTIS 130 (Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicios 130).

Número de compuesto	Especie	Correlación	Significancia de la correlación
13	<i>Ligustrum lucidum</i>	0.61726	0.57649

Las correlaciones más altas fueron negativas y se encontraron entre las PM10 y el compuesto **4** (ácido fenólico), presente en *Schinus terebinthifolius*, (-0.99699 Tabla 17) y entre el compuesto 8 (derivado de ácido elágico), presente en *Casuarina equisetifolia* y PM 2.5 (-0.92475 Tabla 17.3). Resultados similares fueron reportados por Robles *et al.* (2015), quienes informaron sobre una correlación negativa entre la concentración de los flavonoles canferol, quercetina y mericitina de *Pinus halepensis* y la concentración SO₂ ($r = -0.336$, $P < 0.05$). Aunque en el presente estudio también se encontró una correlación alta positiva entre los valores de SO₂ y el compuesto **54** (apigenina 7-O-glicósido) presente en el tejido foliar de *Cupressus macrocarpa* (0.9522, Tabla 17.1).

VII. CONCLUSIONES

- Las concentraciones de fenoles totales foliares fueron acumulados de manera especie-específica.
- Para una misma especie, las concentraciones de fenoles totales fueron variables de acuerdo al lugar de crecimiento y la época del año, siendo *Schinus terebinthifolius* (pirul chino) colectada en agosto en el sitio CIIDIR, la que acumuló la cantidad más alta (65.69 mg/g ES)
- Las concentraciones de fenoles totales fueron características para cada época del año.
- Como las concentraciones de fenoles totales foliares, las de taninos foliares también fueron especie-específicas.
- Para una misma especie, las concentraciones de taninos fueron variables según el lugar de crecimiento y la época del año, siendo *Ficus retusa*, colectada en febrero en el sitio ITD, la que acumuló la cantidad más alta (27.95 mg EEC/g ES).
- Las concentraciones de fenoles totales más bajas se presentaron en otoño en todos los sitios a diferencia de la las concentraciones de taninos condensados que solo presentaron este comportamiento para el sitio PROFEPA.
- Las variaciones en las concentraciones de fenoles totales y taninos condensados fueron típicas por época del año a diferencia de otros trabajos en donde no encuentran una tendencia general en la variación estacional de compuestos fenólicos. Diferencias que, de acuerdo a los resultados de los análisis de correlación, pueden estar asociadas a los niveles variables de partículas y gases presentes en el aire.
- Se encontraron correlaciones negativas y positivas entre los niveles de concentración de fenoles totales, taninos condensados y los niveles de partículas en el aire.
- Para fenoles totales, las correlaciones negativas más altas se encontraron entre *Ficus retusa* y SO₂ (-0.9982) y entre *Pinus greggii* y PM 2.5 (-0.9985),

mientras que las mayores concentraciones positivas se encontraron entre *Ligustrum lucidum* y NO_x (0.9351) y entre *Ligustrum lucidum* y O₃ (0.9370).

- Para taninos, las correlaciones negativas más altas se encontraron entre *Cupressus macrocarpa* y O₃, SO₂, y CO (-0.9730, -0.9284, y -0.9408, respectivamente), mientras que las mayores correlaciones positivas se encontraron entre *Casuarina equisetifolia* y PM 2.5 (0.99477), y entre *Ligustrum lucidum* y O₃ (0.97739).
- Para los compuestos individuales, las correlaciones negativas más altas se encontraron entre las PM10 y el compuesto **4** (un ácido fenólico encontrado en *Schinus terebinthifolius*) y entre el compuesto **8** (un derivado de ácido elágico encontrado en *Casuarina equisetifolia*) y las partículas PM 2.5.
- Para los compuestos individuales, las correlación positivas más altas se encontraron entre SO₂ y el compuesto **54** (Apigenina 7-O-glicósido encontrado en *Cupressus macrocarpa*).
- Las concentraciones de los diversos compuestos fenólicos analizados de una especie dada de planta pueden servir como indicadores de la época del año en que se colecta y de la presencia de contaminantes atmosféricos.

VIII. RECOMENDACIONES Y SUGERENCIAS

- Es necesario realizar más estudios sistemáticos controlando las exposiciones de una diversidad más amplia de especies de plantas a cada uno de los contaminantes del aire.
- Se recomienda realizar estudios con este tema de investigación para determinar los mecanismos bioquímicos y epigenéticos que regulan el aumento o la disminución de las concentraciones de compuestos fenólicos de plantas expuestas a diferentes niveles de contaminación atmosférica

IX. BIBLIOGRAFÍA

Albert, L. A. 2004. Contaminación ambiental. Origen, clases, fuentes y efectos. Revista de la Facultad de Salud Pública y Nutrición 14: 228-23.

Alcalá, J., J.C. Rodríguez, M.Á. Tiscareño, A. Hernández, J.J. Tapia, C. Loredó, E. Villaseñor. 2011. Mitigación del impacto ambiental del polvo atmosférico a través de *Prosopis laevigata* y *Schinus molle*. Multequina 20: 83-96.

Almaraz-Abarca, N., M.G. Campos, J. A. Ávila-Reyes, N. Naranjo-Jiménez, J. Herrera-Corral, L.S. Gonzales-Valdez. 2004. Variability of antioxidant activity among honeybee-collected pollen of different botanical origin. Interciencia 29: 574-585.

Almaraz-Abarca, N., J.A. Ávila-Reyes, E.A. Delgado-Alvarado, N. Naranjo-Jiménez, J. Herrera-Corral. 2006a. El metabolismo secundario de las plantas, un nuevo concepto. Vidsupra 1: 39-50.

Almaraz-Abarca, N.; M. S. González-Elizondo, J. A; Tena-Flores; J. A. Ávila-Reyes; N. Naranjo-Jiménez; J. Herrera-Corral. 2006b. Foliar flavonoids distinguish *Pinus leiophylla* and *Pinus chihuahuana* (Confiales: Pinaceae). Proceedings of the Biological Society of Washington 119: 426-436.

Almaraz-Abarca, N., M.G. Campos, J. A. Ávila-Reyes, N. Naranjo-Jiménez, J. Herrera-Corral, L.S. Gonzales-Valdez. 2007. Antioxidant activity of polyphenolic extract of monofloral honeybeecollected pollen from mesquite (*Prosopis juliflora*, Leguminosae). Journal of Food Composition and Analysis 20: 119-124.

Almaraz-Abarca, N., M.G. Campos, E.A. Delgado-Alvarado, J.A. Ávila-Reyes, J. Herrera-Corral, L.S. González-Valdez, N. Naranjo-Jiménez, C. Frigerio, A.F. Tomatas, A.J. Almeida, A. Vieira, J.N. Uribe-Soto. 2008. Pollen flavonoid/ phenolic acid composition of four species of Cactaceae and its taxonomic significance. American Journal of Agricultural and Biological Sciences 3: 534- 543.

Almaraz-Abarca, N., D. M. Rivera-Rodríguez, D. Arráez-Román, A. Segura-Carretero, J. de J. Sánchez-González, A. Delgado-Alvarado, J. A. Ávila-Reyes. 2013a. Los fenoles del polen del género *Zea*. *Acta Botánica Mexicana* 105: 59-85.

Almaraz-Abarca, N., M. S. Gonzáles-Elizondo, M. G. Campos, Z. E. Ávila-Sevilla, E. A. Delgado-Alvarado, J. A. Ávila-Reyes. 2013b. Variability of the foliar phenol profiles of the *Agave victoriae-reginae* complex (Agavaceae). *Botanical Sciences* 91:295-306.

Aninbon, C., S. Jogloy, N. Vorasoot, A. Patanothai, S. Nuchadomrong, T. Senawong. 2016. Effect of end of season water deficit on phenolic compounds in peanut genotypes with different levels of resistance to drought. *Food Chemistry* 196: 123-129.

Arámbula-Salazar, J. A., N. Almaraz-Abarca, J. J. Corral-Rivas, E. A. Delgado-Alvarado, R. Díaz-Moreno, E. Montiel-Antuna. 2015. Variability in foliar phenolic composition of several *Quercus* species in northern Mexico. *Pakistan Journal of Scientific and Industrial Research Series A: Physical Sciences* 58: 79-89.

Ávalos, G. A, C. E. Pérez-Urría. 2009. Metabolismo secundario de plantas. *Reduca (Biología) Serie Fisiología Vegetal* 2: 119-145.

Baas, W. J. 1989. Causes and consequences of variation in growth rate and productivity of higher plants. En H. Lambers, M.L. Cambridge, H. Konings, T. L. Pons (eds). *SPB Academic Publishing, The Hague*, pp: 313-340.

Bravo, A.H., G. R-Ocotla, R.P. Sánchez, R. Torres. 1991. Contaminación atmosférica por ozono en la zona metropolitana de la Ciudad de México: evolución histórica y perspectivas. Sección de Contaminación Ambiental, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, México.

Bourgaud, F., A. Gravot, S. Milesi, E. Gontier. 2001. Production of plant secondary metabolites: A historical perspective. *Plant Science* 161: 839-851.

Campos, M.G. 1997. Caracterizacao do pólen apícola pelo seu perfil em compostos fenólicos e pesquisa de algumas actividades biológicas. Dissertacao de candidatura ao grado de Doutor. Universidade de Coimbra, Portugal.

Campos, M.G., K. R. Markham. 2007. Structure information from HPLC and on-line measures absorption spectra: flavones, flavonols and phenolic acids. Coimbra University Press. Portugal.

CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). 1991. Impacto ecológico de contaminantes atmosféricos. Seminario Regional sobre Políticas para la Gestión de los Residuos Urbanos e Industriales. CEPAL/PNUMA, Santiago de Chile.

Croteau, R., T. M. Kutchan, N. Lewis. G. 2000. Natural products (secondary metabolites). *Biochemistry and Molecular Biology of Plants* 24: 1250-1319.

Cheyrier, V., G. Comte, K. M. Davies, V. Lattanzio, S. Martens. 2013. Plant phenolics: Recent advances on their biosynthesis, genetics, and ecophysiology. *Plant Physiology and Biochemistry* 72:1-20.

Escamilla, J. C. I., E. Cuevas, J. Guevara. 2009. Flavonoides y sus acciones antioxidantes. *Revista de la Facultad de Medicina UNAM* 52:73-75.

Dalmaso, A., R. Candia, J. Llera. 1997. La vegetación como indicadora de la contaminación por polvo atmosférico. *Multequina* 6: 85-91.

DeBerardinis, J. R., C. B. Thompson. 2012. Cellular Metabolism and Disease: What do metabolic outliers teach us? *Cell* 148:1132-1144.

Del Valle, J. C., M. L. Buide, I. Casimiro-Soriguer, J. B. Whittall, E. Narbona. 2015. On flavonoid accumulation in different plant parts: Variation patterns among individuals and populations in the shore campion (*Silene littorae*). *Frontiers in Plant Science* 6: 939.

Dixon, R.A. 2001. Natural products and plant disease resistance. *Nature* 411: 843-847.

Espinosa-Alonso, L., A. Lygin, J. M. Widholm, M. E. Valverde, O. Paredes-López. 2006. Polyphenols in wild and weedy Mexican common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54: 4436-4444.

Finlayson-Pitts, J., J.N.Jr. Pitts. 1986. *Atmospheric Chemistry: Fundamentals and Experimental Techniques*, John Wiley and Son, New York.

Fenger, J. 1999. Urban air quality. *Atmospheric Environment* 33: 4877- 4900.

Gutiérrez, G. D. E. 2014. Contaminación ambiental en ladrillos artesanales Departamento Puno. Universidad Andina "Néstor Cáceres Velásquez"-J. Escuela de Post Grado / Doctorado en Salud Pública. Juliaca – Perú. <http://www.monografias.com/trabajos101/contaminacion-ambiental-ladrillos-artesanales-departamento-puno/contaminacion-ambiental-ladrillos-artesanales-departamento-puno.shtml>.

Hadacek, F. 2002. Secondary metabolites as plant traits: Current assessment and future perspectives. *Critical Review in Plant Science* 21: 273-322.

Harborne, W., L. Tuner. 1984. *Plant chemosystematics*. Academic Press. London.

Huang, W. Y., Y. Z. Cai, Y. Zhang. 2009. Natural phenolic compounds from medicinal herbs and dietary plants: Potential use for cancer prevention. *Nutrition and Cancer* 62:1-20.

INECC, 2014. Disponible en <http://www.inecc.gob.mx/calibre-informacion-basica/537-calibre-fuentes>. Recuperado el 01 de Noviembre de 2015.

INEGI. 2010. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Durango, Dgo. (Clave geoestadística 10005). Disponible en: [http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos_geograficos/10/10005.pdf] Recuperado el 11 de Enero de 2016.

Iriti, M., F. Faoro. 2009. Chemical diversity and defence metabolism: How plants cope with pathogens and ozone pollution. *International Journal of Molecular Sciences* 10: 3371-3399.

Julkunen-Tiitto, R. 1985. Phenolic constituents in the leaves of northern willows: Methods for the analysis of certain phenolics. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 33: 213-217.

Kennedy, D. O., E. L. Wightman. 2011. Herbal extracts and phytochemicals: plant secondary metabolites and the enhancement of human brain function. *Advances in Nutrition* 2: 32:50.

Kutchan, M. T. 2001. Ecological arsenal and developmental dispatcher. The Paradigm of secondary metabolism. *Plant Physiology* 125: 58-60.

Kumari, M., S. Jain. 2012. Tannins: An antinutrient with positive effect to manage diabetes. *Research Journal of Recent Sciences* 1: 1-8.

Markham, K. R. 1982. Techniques of flavonoid identification. Academic Press, London.

Markham, K. R., M. Campos. 1996. 7- and 8-O-methylherbacetin-3-O-sophorosides from bee pollens and some structure/activity observations. *Phytochemistry* 43: 763-767.

Martínez, S., A. Rodríguez de Torres. 2000. Evaluación de la Contaminación Atmosférica Producida por Partículas en Suspensión en las Redes de Calidad del Aire de la Comunidad de Madrid. Departamento de Impacto Ambiental de la Energía. Informes Técnicos Ciemat. Editorial CIEMAT. Madrid, España.

Mazid, M., T. A. Khan, F. Mohammad. 2011. Role of secondary metabolites in defense mechanisms of plants. *Biology and Medicine* 3: 232-249.

Medina-Medrano, J. R., N. Almaraz-Abarca, M. S. González-Elizondo, J. N. Uribe-Soto, L. S. González-Valdez, Y. Herrera-Arrieta. 2015. Phenolic constituents and antioxidant properties of five wild species of *Physalis* (Solanaceae). *Botanical Studies* 56: 24.

Mendes de Rezende, F., C. M. Furlan. 2009. Anthocyanins and tannins in ozone-fumigated guava trees. *Chemosphere* 76: 1445-1450.

Monreal-García, H. M. 2015. Compuestos fenólicos y la actividad biológica en tres especies de plantas silvestres del estado de Durango, México, (*Fouquieria splendens*, *Dodonaea viscosa* y *Physalis angulata*). Tesis de Maestría. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional unidad Durango, Instituto Politécnico Nacional, México.

Oksman-Caldentey, K. M., D. Inzé. 2004. Plant cell factories in the post-genomic era: new ways to produce designer secondary metabolites. *Trends in Plant Science* 9: 443-440.

Pandey, K. B., S. I. Rizvi. 2009. Plant polyphenols as dietary antioxidants in human health and disease. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity* 2: 270-278.

Pascuallini, V., C. Robles, S. Garzino, S. Greff, A. Bousquet-Melou, G. Bonin. 2003. Phenolic compounds content in *Pinus halepensis* Mill. needles: A bioindicator of air pollution. *Chemosphere* 52: 239-248.

Puliafito, E., M. Guevara, C. Puliafito, M. Gantuz, R. Inzirillo. 2000. Memorias del X Congreso Nacional de Cartografía. Centro Argentino de Cartografía, Buenos Aires, pp. 37-49.

Raal, A., T. Boikova, T. Püssa. 2015. Content and dynamics of polyphenols in *Betula* spp. leaves naturally growing in Estonia. *Records of Natural Products* 9: 41-48.

Rezanejad, F. 2009. Air pollution effects on structure, proteins and flavonoids in pollen grains of *Thuja orientalis* L. (Cupressaceae). *Grana* 48: 205-213.

Rezanejad, F. 2012. Air pollution effects on flavonoids in pollen grains of some ornamental plants. *Turkish Journal of Botany* 36: 49- 54.

Rezende, F. M., C. M. Furlan. 2009. Anthocyanins and tannins in ozone-fumigated guava trees. *Chemosphere* 76: 1445-1450.

Rivera-Rodríguez, D. M., A. Reyes-Martínez, G. Barriada-Bernal, J. J. Sánchez-González, N. Almaraz-Abarca, E. A. Delgado-Alvarado, N. Naranjo-Jiménez, Y. Herrera-Arrieta. 2011. Composición fenólica de tejido foliar y de polen de *Zea perennis*. *Vidsupra* 3: 5-11.

Robles, C., Greff, S., Pasqualini, V., Garzino, S., Bousquet-Mélou, A., Fernandez, C., Bonin, G. 2003. Phenols and flavonoids in Aleppo pine needles as bioindicators of air pollution. *Journal of Environmental Quality* 32: 2265-2271.

Sandre, A. A., J. M. Pina, R. M. Moraes, C. M. Furlan. 2014. Anthocyanins and tannins: is the urban air pollution an elicitor factor. *Brazilian Journal of Botany* 37: 9-18.

SEECO, 2015. Información económica y estatal Durango. Disponible en <http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/43333/Durango.pdf>. Recuperado el 9 de Junio de 2017.

SEMARNAT. 2015. Inventario de Emisiones. Disponible en: <http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestion-ambiental/calidad-del-aire/inventario-de-emisiones>. Recuperado el 15 de Octubre de 2015.

SEMARNAT. 2017. Estrategia nacional de cambio climático. http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/informacionambiental/Documents/06_otras/ENCC.pdf. Recuperado el 9 de Marzo de 2017

Sharma, P., A. K. Ghimeray, A. Gurung, C. W. Jin, H. S. Rho, D. H. Cho. 2012. Phenolic contents, antioxidant and glucosidase inhibition properties of Nepalese strain buckwheat vegetables. *African Journal of Biotechnology* 11: 184–190.

Sienfield, J. H. 1998. Urban Air Pollution: state of the science 243: 745-752.

SINEA. 2017. Inventario de emisiones. <http://sinea.semarnat.gob.mx/sinea.php>. Recuperado el 30 de Mayo de 2017.

Sosa, D. T. 2003. Contribución al estudio de las funciones ecológicas que pueden desempeñar los compuestos derivados del metabolismo secundario en *Cistus ladanifer* L. Universidad de Extremadura. Facultad de Ciencias Departamento de Bioquímica y Biología Molecular. España.

Spengler, J., K. Sexton. 1993. Indoor air pollution: A public health perspective. *Science (New series)* 221: 9-17.

SRNyMA, 2014. Índices de calidad del aire. Gobierno del estado de Durango 2016-2022. <http://calidadaire.durango.gob.mx/indicator>. Recuperado el 15 de Mayo de 2017.

SRNyMA, 2016. Programa de gestión para mejorar la calidad del aire en el estado de Durango. Gobierno del estado de Durango 2016-2022. http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/191389/ProAire_Durango.pdf. Recuperado el 15 de Mayo de 2017.

Taiz, L., E. Zeiger. 1991. Plant Physiology. Benjamin Cummings, USA.

Tajvar, Y., R. G. Fotouhi, Y. Hamidoghli, R. H. Sajedi. 2011. Antioxidant changes of Thomson navel orange (*Citrus sinensis*) on three rootstocks under low temperature stress. Horticulture, Environment and Biotechnology 52: 576–580.

Vallejo, M., K. Jáuregui-Renaud, A.G. Hermosillo, M.F. Márquez, M. Cárdenas. 2003. Efectos de la contaminación atmosférica en la salud y su importancia en la Ciudad de México. Gaceta Médica de México 103: 57-63.

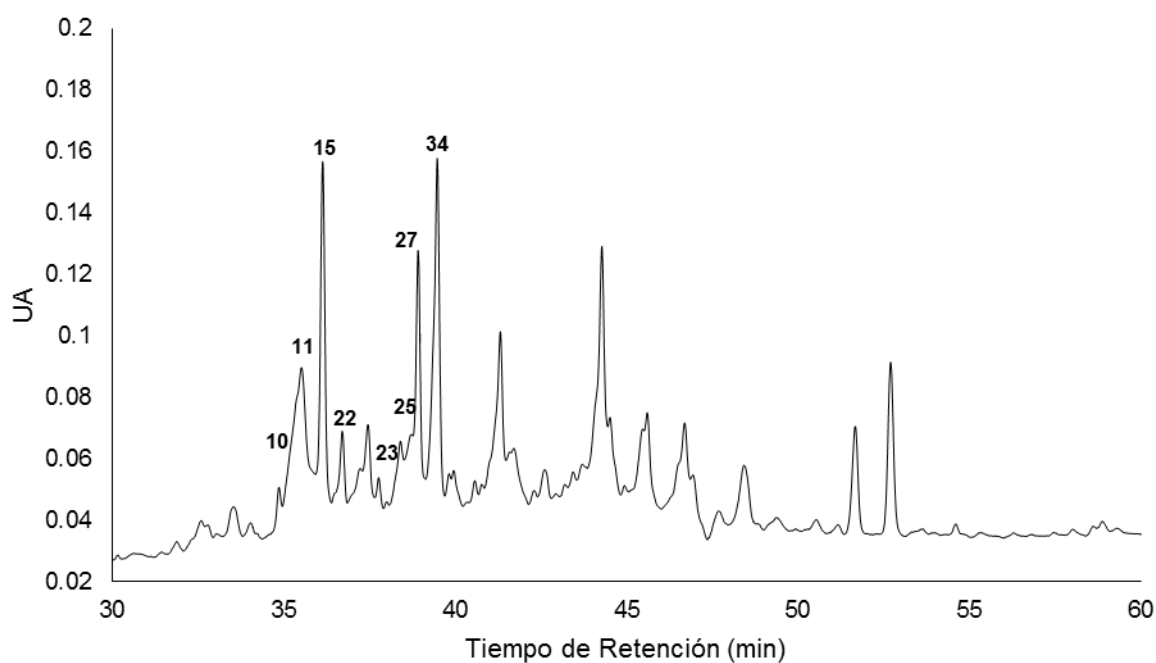
Vitela, A. E., L. González-Paleo, D. A. Ravetta. 2011. Metabolismo secundario de plantas leñosas de zonas áridas: mecanismos de producción, funciones y posibilidades de aprovechamiento. Ecología Austral 21: 317-327.

Zobel, A., J. E. Nighswander. 1991. Accumulation of phenolic compounds in the necrotic areas of Austrian and red pine needles after spraying with sulphuric acid: a possible bioindicator of air pollution. New Phytologist 117: 565-574.

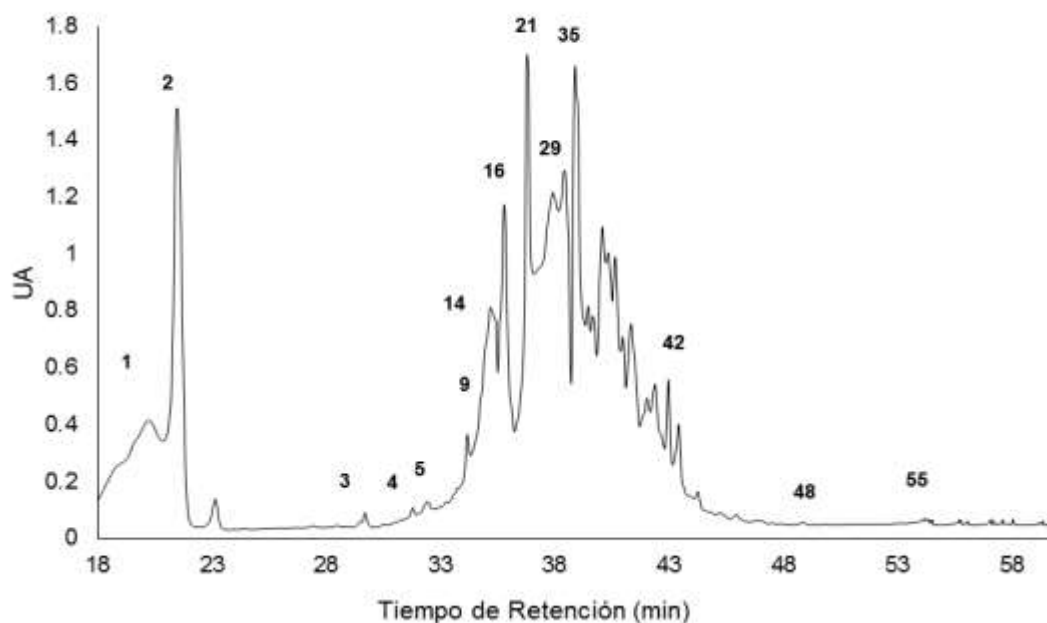
X. ANEXOS

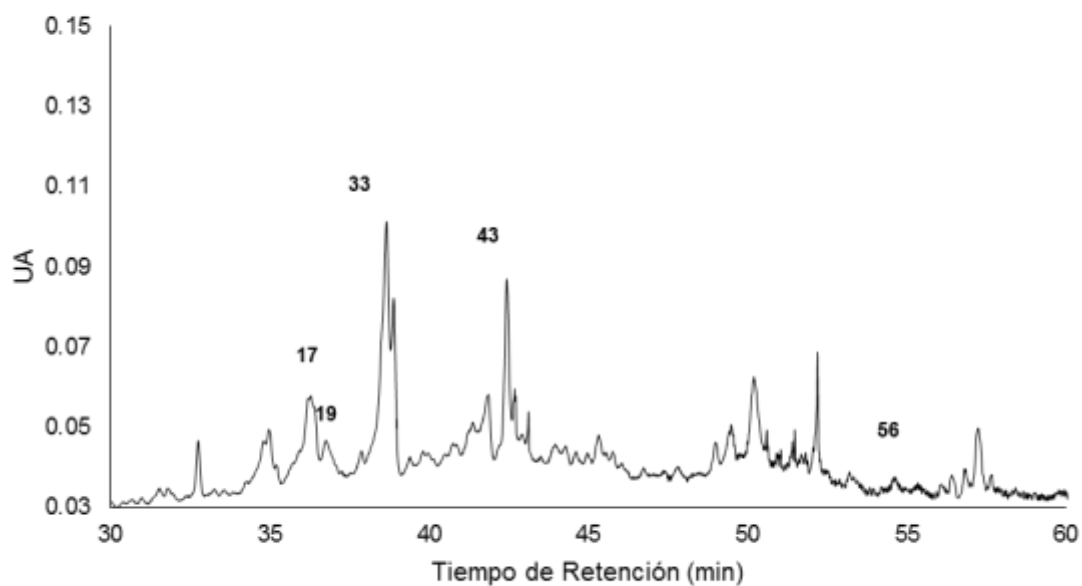
ANEXO 1. Cromatogramas obtenidos por HPLC-DAD de los extractos fenólicos foliares de las siete especies de plantas analizadas.

Ligustrum japonicum



Schinus terebinthifolius



Pinus greggii***Cupressus macrocarpa***