

INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIA
APLICADA Y TECNOLOGÍA AVANZADA,
UNIDAD ALTAMIRA**

**BIOINDICADORES URBANOS DE METALES
EN MATERIAL PARTICULADO
DEL AIRE A PARTIR DE DOS ESPECIES DE
GECKONIDOS**

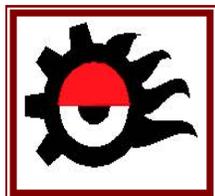
T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN TECNOLOGÍA AVANZADA**

**PRESENTA
LUISIANA MORALES ZAMUDIO**

DIRECTORES DE TESIS

**DR. ALEJANDRO FIERRO CABO
DR. MIGUEL ANTONIO DOMINGUEZ CRESPO**



SEPTIEMBRE 2009. ALTAMIRA, TAMAULIPAS.



SIP-13

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS Y DESIGNACIÓN DE DIRECTOR DE TESIS

Altamira, Tamps. a 12 de Junio del 2009

El Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICATA-ALT. en su sesión RECP No. 010/09 celebrada el día 17 del mes de JUN-09 conoció la solicitud presentada por el(la) alumno(a):

MORALES	ZAMUDIO	LUISIANA
Apellido paterno	materno	nombre

Con registro:

B	0	6	0	9	2	0
---	---	---	---	---	---	---

Aspirante de: Maestría en Tecnología Avanzada

- 1.- Se designa al aspirante el tema de tesis titulado:
Bioindicadores urbanos de metales en material particulado del aire a partir de dos especies de gekkonidos.

De manera general el tema abarcará los siguientes aspectos:
Reptiles, bioindicadores, contaminación atmosférica.

- 2.- Se designa como Director de Tesis al C. Profesor:
Dr. Alejandro Fierro Cabo
Dr. Miguel Antonio Domínguez Crespo

- 3.- El trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesis será elaborado por el alumno en:
CICATA-ALTAMIRA
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:

El Director de Tesis

Dr. Alejandro Fierro Cabo

El Aspirante

LUISIANA MORALES ZAMUDIO



CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIA
APLICADA Y TECNOLOGÍA AVANZADA
DEL I.P.N.
UNIDAD ALTAMIRA

El Director de Tesis

Dr. Miguel Antonio Domínguez Crespo

El Presidente del Colegio



SIP-14

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Altamira siendo las 16 horas del día 10 del mes de Agosto del 2009 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICATA-ALTAMIRA para examinar la tesis de titulada:

Bioindicadores urbanos de metales en material particulado del aire a partir de dos especies de gekkonidos

Presentada por el alumno:

MORALES

Apellido paterno

ZAMUDIO

Apellido materno

LUISIANA

Nombre(s)

Con registro:

B	0	6	0	9	2	0
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

MAESTRIA EN TECNOLOGÍA AVANZADA

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

LA COMISIÓN REVISORA

Director de Tesis

Dr. Alejandro Fierro Cabo

Director de Tesis

Dr. Miguel Antonio Domínguez Crespo



CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIA
APLICADA Y TECNOLOGÍA AVANZADA
DEL I.P.N.
UNIDAD ALTAMIRA

Dra. Aidé Minerva Torres Huerta

Dr. Gerardo Sánchez Ramos

Dr. Jorge Aurelio Lois Correa

Dr. Abelardo Flores Vela

EL PRESIDENTE DEL
COLEGIO

Dr. Felipe de Jesús Carrillo Romo



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESION DE DERECHOS

En la ciudad de Altamira, Tamaulipas el día 10 del mes Agosto del año 2009, el que suscribe Luisiana Morales Zamudio alumna del Programa de Maestría en Tecnología Avanzada con numero de registro B060920 adscrito al Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del IPN, Unidad Altamira, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Alejandro Fierro Cabo y del Dr. Miguel Antonio Domínguez Crespo y cede los derechos del trabajo titulado Bioindicadores Urbanos de Metales en Material Particulado del Aire a Partir de dos Especies de Geckonidos, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, graficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección luisianamz@gmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Luisiana Morales Zamudio

Nombre y firma

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico a la mujer que me ha brindado su apoyo incondicional, pero principalmente por sus consejos y enseñanzas.

A ti MAMA por que sin ti no habría sido posible estar donde estoy.

GRACIAS MAMI

Agradecimientos especiales a mi PAPA y HERMANA, por que sin su amor y comprensión no habría tenido la misma inspiración.

AGRADECIMIENTOS:

A los Doctores que contribuyeron a la realización de este proyecto, por haber confiado en mí, por proporcionarme parte de sus conocimientos y experiencia.

Dr. Jesús Damián de la Rosa Díaz

Dr. Alejandro Fierro Cabo

Dr. Miguel Antonio Domínguez Crespo

Dr. Sri Krishna Chaitanya Singara

Dra. Aidé Minerva Torres Huerta

Dr. Gerardo Sánchez Ramos

Dr. Jorge A. Lois Correa

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Instituto Politécnico Nacional por su apoyo económico para la realización de la Maestría en Tecnología Avanzada.

A la Universidad de Huelva, España y al Director de Investigación de esta Dr. Jesús Damián de la Rosa Díaz por su incondicional apoyo en la investigación así como en el uso de las instalaciones durante mi estancia en la Universidad.

Al Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA) Unidad Altamira, por su apoyo en la ejecución del programa de Maestría en Tecnología Avanzada.

ÍNDICE GENERAL

Relación de cuadros	X	
Relación de figuras	XII	
Resumen	XIII	
Abstract	XIV	
	Pag.	
Introducción	1	
Capítulo I. Objetivos é Hipótesis	3	
1.1	Objetivo general	3
1.1.1	Objetivos específicos	3
1.2	Hipótesis.	4
Capítulo II. Fundamento teórico	5	
2.1	Partículas como contaminantes.	5
2.1.1	Origen de las partículas.	6
2.1.2	Morfología de las partículas suspendidas.	7
2.2	Influencia de la meteorología.	10
2.3	Inventario de emisiones atmosféricas.	11
2.3.1	Inventario de emisiones atmosféricas en Tamaulipas, México.	11
2.3.2	Inventario de emisiones atmosféricas en Huelva, España.	13
2.4	Metodologías empleadas para el monitoreo de emisiones atmosféricas.	16
Capítulo III. Antecedentes	22	
3.1	Bioindicadores.	22
3.2	<i>Hemidactylus frenatus</i> .	25
3.3	<i>Tarentola mauritanica</i> .	27

Capítulo IV. Materiales y métodos	30
4.1 Descripción de los sitios de muestreo.	30
4.1.1 México.	30
4.1.2 España.	32
4.2 Captura de geckos.	35
4.2.1 <i>Hemidactylus frenatus</i> .	35
4.2.2 <i>Tarentola mauritanica</i> .	35
4.3 Preparación de muestras.	35
4.3.1 <i>Hemidactylus frenatus</i> .	35
4.3.2 <i>Tarentola mauritanica</i> .	36
4.4 Extracción de metales.	36
4.4.1 Manejo de cristalería.	36
4.4.2 <i>Hemidactylus frenatus</i> .	37
4.4.2.1 Extracción de metales con el microondas Multiwave 300.	37
4.4.2.2 Extracción de metales con el método de digestión abierta.	37
4.4.3 <i>Tarentola mauritanica</i> .	38
4.4.3.1 Extracción de metales con el microondas Multiwave 300.	38
4.5 Análisis de metales con el equipo ICP-MS.	39
4.6 Recuperación de metales.	39
4.7 Análisis estadísticos.	40
Capítulo V. Resultados y discusiones	42
5.1 Calidad en la extracción de los metales.	42
5.2 <i>Hemidactylus frenatus</i> .	43
5.2.1 Concentraciones de metales en tejido de especímenes con y sin tracto digestivo.	43
5.2.2 Diferencias entre sitios de muestreo.	45
5.2.3 Correlaciones entre metales.	49
5.3 <i>Tarentola mauritanica</i> .	52

5.3.1	Diferencias entre géneros.	52
5.3.2	Diferencias entre diferentes partes del cuerpo.	52
5.3.3	Correlación entre partes del cuerpo con relación al contenido de metales.	54
5.3.4	Concentraciones de metales en tejido de especímenes con tracto digestivo y sin tracto digestivo.	54
5.3.5	Diferencias entre sitios de muestreo.	61
5.3.6	Correlación entre metales.	68
5.4	Comparación de niveles de metal entre ambas especies (<i>Tarentola mauritanica</i> y <i>Hemidactylus frenatus</i>).	70
5.5	Comparación de <i>Hemidactylus frenatus</i> y <i>Tarentola mauritanica</i> con otros geckos.	70
Capítulo VI. Conclusiones		73
Bibliografía.		75
Apéndices		87
	Apéndice A	88
	Apéndice B	89
	Apéndice C	93
	Apéndice D	97
	Apéndice E	98
	Apéndice F	99
Glosario		100
Índice Temático		102

RELACIÓN DE CUADROS

Cuadro 1	Clasificación de partículas atmosféricas de acuerdo a su morfología.	9
Cuadro 2	Fuentes totales de emisión en Tamaulipas.	12
Cuadro 3	Fuentes totales de emisión en la zona conurbada del sur de Tamaulipas.	12
Cuadro 4	Niveles medios de concentración de elementos mayores y traza en PM ₁₀ obtenidos en Huelva en el periodo 13/07/01 a 12/06/02.	15
Cuadro 5	Comparación de las diversas metodologías utilizadas para el monitoreo de la calidad del aire.	21
Cuadro 6	Porcentaje de recuperación de metales en TORT-2.	42
Cuadro 7	Concentración de metales en tejido del <i>Hemidactylus frenatus</i> con tracto digestivo (Media, \pm desviación estándar, rango y resultados del test de Duncan, presentados en ($\mu\text{g/g}$), base seca).	44
Cuadro 8	Concentración de metales en tejido del <i>Hemidactylus frenatus</i> sin tracto digestivo (Media, \pm desviación estándar, rango y resultados del test de Duncan, presentados en ($\mu\text{g/g}$), base seca).	45
Cuadro 9	Correlaciones de Pearson para concentraciones de metales en tejido del <i>Hemidactylus frenatus</i> (todos los sitios combinados). Correlaciones de datos sin tracto se encuentran arriba de la diagonal, las correlaciones de datos con tracto se encuentran por debajo de la diagonal.	49
Cuadro 10	Concentración de metales en tejido de <i>Tarentola mauritanica</i> (Media, \pm desviación estándar, rango y resultados del test de Duncan, presentados en ($\mu\text{g/g}$) base seca). Cuerpo completo (con tracto digestivo)	55
Cuadro 11	Concentración de metales en tejido de <i>Tarentola mauritanica</i> (Media, \pm desviación estándar, rango y	56

	resultados del test de Duncan, presentados en ($\mu\text{g/g}$) base seca). Cuerpo con cola y sin tracto digestivo (sin tracto digestivo).	
Cuadro 12	Concentración de metales en tejido de <i>Tarentola mauritanica</i> (Media, \pm desviación estándar, rango y resultados del test de Duncan, presentados en ($\mu\text{g/g}$) base seca).	57
Cuadro 13	Correlación Pearson entre concentración de metales en tejido de <i>Tarentola mauritanica</i> (todos los sitios combinados). Correlaciones de datos sin tracto se encuentran arriba de la diagonal, las correlaciones de datos con tracto se encuentran por debajo de la diagonal.	68

RELACIÓN DE FIGURAS

Figura 1	<i>Hemidactylus frenatus</i>	25
Figura 2	<i>Tarentola mauritanica</i>	27
Figura 3	Zona de estudio del <i>Hemidactylus frenatus</i>	31
Figura 4	Zona de estudio del <i>Tarentola mauritanica</i> .	33
Figura 5	Concentraciones medias ($\mu\text{g/g}$, base seca) y desviaciones estándar (barras) para los metales Pb, V, Ni, Cu, Zn, Cd (con tracto digestivo) y Mn (sin tracto digestivo) para cada sitio en tejido de <i>Hemidactylus frenatus</i> .	48
Figura 6	Dendrograma de correlación de metales en especímenes (<i>Hemidactylus frenatus</i>) con tracto digestivo.	51
Figura 7	Dendrograma de correlación de metales en especímenes (<i>Hemidactylus frenatus</i>) sin tracto digestivo.	51
Figura 8	Concentraciones medias ($\mu\text{g/g}$, base seca) y desviaciones estándar para los metales Li, B, V, Ni, Cr, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Sn, Sb, Ba y Pb, en especímenes (<i>Tarentola mauritanica</i>) con tracto digestivo (cuerpo completo) para cada sitio.	65
Figura 9	Dendrograma de correlación de metales en especímenes (<i>Tarentola mauritanica</i>) con tracto digestivo.	69
Figura 10	Dendrograma de correlación de metales en especímenes (<i>Tarentola mauritanica</i>) sin tracto digestivo. Dendrograma de correlación de metales en especímenes (<i>Tarentola mauritanica</i>) con tracto digestivo.	69

RESUMEN

La contaminación atmosférica por metales en material particulado del aire originados principalmente por actividades industriales y el incremento del tráfico vehicular en países industrializados y en desarrollo, ha afectado áreas urbanas y rurales, provocando daños a la salud humana. Las técnicas de monitoreo atmosférico comúnmente utilizadas están divididas en cinco categorías: medidores pasivos, medidores activos, monitores automáticos, sensores remotos y bioindicadores. El uso de bioindicadores como técnica de monitoreo atmosférico ha sido poco utilizada, limitándose a insectos, aves y plantas. Hasta ahora los reptiles no han sido utilizados para este fin. En esta investigación se propuso el uso de los geckos *Hemidactylus frenatus* y *Tarentola mauritanica* como bioindicadores de metales contenidos en material particulado del aire en el medio urbano. El estudio se realizó en Tamaulipas, México y Huelva, España durante el 2007 y 2008 respectivamente. Los geckos fueron colectados en sitios afectados por diversas fuentes de contaminación, así como en sitios referencia. Se analizaron los contenidos de Li, B, V, Cr, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Sn, Sb, Ba, Pb, Cd, Mn y Co en tejido de los geckos para *Hemidactylus frenatus* (cuerpo con y sin tracto digestivo) y para *Tarentola mauritanica* (cola, cuerpo, tracto digestivo, cuerpo con y sin tracto digestivo). Los resultados de este estudio muestran que los geckos con tracto digestivo proveen los mejores resultados para la mayoría de los metales analizados, sin necesidad de analizar ninguna parte u órgano del cuerpo por separado, así como haciendo una adecuada discriminación de los sitios de estudio. Este estudio demuestra que los geckos *Hemidactylus frenatus* y *Tarentola mauritanica* pueden ser utilizados como bioindicadores de metales en material particulado del aire, en las regiones donde estos geckos sean abundantes. Esto resulta de considerable interés para implementar programas de monitoreo atmosférico basado en geckos en países en vías de desarrollo con pocos recursos financieros. Su afinidad con el hábitat artificial humano los convierte en bioindicadores específicamente urbanos de este tipo de contaminación omnipresente en ciudades y zonas industriales alrededor del mundo.

ABSTRACT

Nowadays considerable attention is focused to the health of ecosystems and their component parts. In atmospheric pollution transport of contaminants can occur rapidly, leading uptake and accumulation in higher trophic levels. Such accumulation may cause a significant affectation in both rural and urban areas. Non destructive sampling techniques are commonly used to asses and monitor contaminant presence, such as; passive, active and automatic tracers, as well as remote sensors and bioindicators. The use of bioindicators has been rarely explored for assessing atmospheric pollution. However, some species have the potential to serve as bioindicators of atmospheric pollutants by means of comparative data in different locations. In this work we examined the contents of metals in geckos from southern Tamaulipas, Mexico and Huelva, Spain, during 2007 and 2008, respectively. The geckos were collected in rural sites as well as in highly industrialized and urbanized areas, affected by different airborne contaminants. Contents of Li, B, V, Cr, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Sn, Sb, Ba, Pb, Cd, Mn y Co were determined in *Hemidactylus frenatus* (body with and without digestive tract), and in *Tarentola mauritanica* (body with and without digestive tract, tail and digestive tract). Results show that the geckos with digestive tract provide more consistent indicative data for the majority of the metals analyzed. It was concluded that it is not necessary evaluate separately any part of the body. Generally, results adequately discriminate study sites. The results also indicated that both species of geckos are suitable bioindicators of metals in air particulate matter where they have abundant populations. Examining metal contents in geckos as bioindicators can be used to implement atmospheric monitoring programs in countries with low financial resources. Their affinity to human modified habitats make these geckos adequate bioindicators of atmospheric contaminants, particularly useful in cities and industrialized areas in tropical regions around the world.

INTRODUCCIÓN

El constante crecimiento de asentamientos humanos y de zonas industrializadas ha provocado un acelerado deterioro en la calidad del agua, suelo y aire, afectando al medio ambiente así como a todos los seres vivos en esas zonas. Las emisiones atmosféricas han impactado en distintos grados la salud de los seres vivos, incluyendo al hombre por lo que en las últimas décadas surge la necesidad de monitorear y controlar los contaminantes atmosféricos. Los efectos que se producen en seres humanos por la inhalación de partículas atmosféricas son conocidos debido a una serie de estudios epidemiológicos [1-3]. Dichos efectos se han evaluado mostrando una acumulación de partículas en pulmones que provocan inflamación y diversos daños a los mismos [3].

Particularmente, en lo que se refiere a la contaminación por metales, se ha encontrado que tal afectación es ocasionada principalmente por la fracción soluble del material particulado y dependiendo de su contenido en esta parte se puede inducir a un daño pulmonar [4]. Actualmente, se conoce que la toxicidad y los efectos que producen las partículas en la salud son determinados por su tamaño y composición química [5]. Los metales contenidos en PM_{10} (partículas de diámetro aerodinámico inferior a $10 \mu m$) se han estudiado en zonas urbanas e industriales en todo el mundo [6-11]. Normalmente, esto se ha realizado por medio de una serie de mediciones periódicas encaminadas a determinar los niveles de fracciones del material particulado PM_{10} y las concentraciones de elementos mayores y traza contenidos en ellos, así como para la identificación de las emisiones antropogénicas o naturales, con especial impacto en la calidad del aire de la zona [12-17].

En el estado de Tamaulipas, México, se ha llevado a cabo el monitoreo de las partículas PM_{10} desde el 2002. En noviembre de 2004 se inició el estudio de metales en las partículas con la determinación de Pb, Mn, Cd y Zn durante el periodo comprendido entre Mayo de 2003 a Abril de 2004. Posteriormente, se determinaron los metales Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, Ni, Ti, V, Zn en 49 muestras PM_{10} , obtenidas en Tampico en periodos de seis días durante el año 2004 [18].

Por otro lado, en España, desde 1999 se vienen realizando en la provincia de Huelva una serie de monitoreos en tiempo real de los niveles de PM_{10} , $PM_{2.5}$ y PM_1 en zonas urbanas, próximas y alejadas de Huelva. Esto permite una caracterización de estas fracciones y delimita el área de impacto, además de realizar estudios para la identificación de las fuentes de emisión con especial impacto en la calidad del aire de la zona [16, 19-24].

En general, estas mediciones se han realizado utilizando técnicas genéricas para el monitoreo de la calidad del aire como lo son: medidores pasivos, medidores activos, analizadores automáticos, sensores remotos y bioindicadores [25]. Una de las técnicas con menor aplicación, pero no menos importante, es el uso de organismos para valorar la contaminación ambiental. Tales organismos son capaces de acumular y percibir contaminantes en su anatomía, debido a esta capacidad biológica, es posible utilizarlos como bioindicadores [25]. Los bioindicadores son organismos que pueden ser usados para la identificación y determinación cualitativa de factores ambientales generadas por actividades humanas, así como la determinación cuantitativa de contaminantes. Estos bioindicadores se han clasificado internacionalmente en biomonitores sensitivos y cualitativos [26].

El uso de bioindicadores acumulativos (cualitativos) como las plantas y animales, se han utilizado para determinar contaminantes en suelo y agua [27-30], sin embargo, poco evaluados en contaminación atmosférica [26, 31-33]. En la actualidad, los estudios realizados en reptiles, viperinos y anfibios como bioindicadores son muy escasos [34], incluyen tortugas [35,36], ranas [37] y víboras [38-40]. Se desconocen estudios en los que se utilicen reptiles como bioindicadores de contaminación atmosférica.

En el presente estudio se analiza la viabilidad de utilizar reptiles de las especies *Hemidactylus frenatus* y *Tarentola mauritanica* presentes en el sur de Tamaulipas, México y sur de Huelva, España, respectivamente, como posibles bioindicadores de metales pesados contenidos en material particulado del aire. Las áreas de interés tienen en común un importante crecimiento de asentamientos humanos y de zonas industrializadas impactando severamente la calidad del aire y los seres vivos que habitan las regiones.

CAPITULO I. OBJETIVOS É HIPÓTESIS

1.1 Objetivo general

Evaluar a los geckos *Hemidactylus frenatus* y *Tarentola mauritanica* como posibles bioindicadores urbanos de metales en material particulado del aire, en las zonas costeras conurbadas del sur de Tamaulipas, México y de Huelva, España.

1.1.1 Objetivos específicos

- Comparar la eficiencia de los diferentes métodos de digestión para la extracción de los metales pesados, utilizando el Material de Referencia Certificado TORT-2.
- Determinar concentraciones en tejido del *Hemidactylus frenatus* y *Tarentola mauritanica* como Pb, Cu, Mn, Ni, Zn, Cd, V, As, Se, Cr, Li, B, Rb, Sr, Sb, Sn y Ba.
- Analizar posibles relaciones entre las concentraciones de metales detectadas en tejido y las principales fuentes de emisiones atmosféricas generadas en la zona de estudio.
- Verificar si existen diferencias significativas entre los sitios de estudio para cada uno de los metales analizados.
- Comprobar si existen diferencias significativas en las concentraciones de metales pesados en tejido de organismos con y sin tracto digestivo en ambas especies.
- Probar si existen diferencias significativas entre sexos en las concentraciones de elementos en *Tarentola mauritanica*
- Demostrar si existen diferencias significativas en las concentraciones de metales entre el tracto digestivo, cola y el cuerpo sin cola y sin tracto digestivo de *Tarentola mauritanica*
- Comparar ambas especies en termino de a su utilidad como bioindicadores de la contaminación atmosférica.

1.2 Hipótesis

La acumulación de metales en tejido de los geckos *Hemidactylus frenatus* y *Tarentola mauritanica* es producto de diferentes emanaciones atmosféricas de origen antropogénico (industrial, urbanismo, etc.) y las concentraciones de diversos elementos en tejido son diferentes entre los sitios de muestreo, permitiendo identificar las zonas de mayor afectación.

CAPÍTULO II. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Partículas suspendidas como contaminantes

Uno de los principales contaminantes del aire son las partículas suspendidas, las cuales contribuyen a la lluvia ácida al tiempo que provocan importantes pérdidas económicas, impactando a la construcción y componentes en general. Además, son causantes de diversos daños a la salud tales como: degradación visual, problemas cardiovasculares, afectación de las vías respiratorias e inclusive cáncer. Según su capacidad de penetración en las distintas zonas del aparato respiratorio, las partículas se clasifican en inhalables (que pueden entrar en el sistema respiratorio), torácicas (que alcanzan la región traqueobronquial) y respirables (las que tienen el potencial de entrada en la región de intercambio de gas) [41].

El sistema respiratorio constituye la principal vía de entrada del material particulado del aire en el organismo. El depósito de las partículas en diferentes partes del cuerpo humano depende del tamaño, forma y densidad de las mismas, así como de la respiración del individuo (nasal u oral). Posteriormente, los efectos que pueden inducir en el organismo dependen de la granulometría, la morfología y la composición química de éstas, el tiempo de exposición y la susceptibilidad de cada persona. Todas las partículas de diámetro inferior a $10\ \mu\text{m}$ (PM_{10} , partículas torácicas) tienen un tamaño suficiente para penetrar en la región traqueobronquial, pero sólo aquellas de diámetro $<2.5\ \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$, partículas respirables) pueden alcanzar la cavidad alveolar y, por tanto, provocar mayores afecciones. Éstas últimas, además, presentan en su composición un mayor contenido en sustancias con capacidad tóxica como los sulfatos, nitratos y sílice [42].

En la actualidad, existe gran interés por examinar el papel tóxico de las partículas ultrafinas o nanopartículas (diámetro aerodinámico $<1\ \mu\text{m}$) en el aire de las ciudades. Más que por su masa, se sospecha que sería el número de partículas ultrafinas en el aire y composición, las que determinarían las características de mayor impacto en salud de las poblaciones expuestas [43].

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) estableció los estándares norteamericanos de la calidad del aire para legislar las partículas suspendidas totales (PST) que se definían como todas aquellas partículas con un diámetro aerodinámico entre 0.01 y 100 μm . En 1987 se reemplazó el estándar primario de PST por el estándar PM_{10} , que incluye solamente aquellas partículas con diámetros menores a 10 μm . Finalmente, en 1997 se adicionó el estándar $\text{PM}_{2.5}$, con partículas menores a 2.5 μm [44].

2.1.1 Origen de las partículas

Generalmente, las partículas se forman por nucleación y crecimiento o por condensación y coagulación. Sin embargo, estudios teóricos sugieren que una gran fracción de aerosoles importantes para el medio ambiente se forma de reacciones fotoquímicas secundarias de los compuestos orgánicos volátiles [45]. Las partículas de fracción fina y fracción gruesa presentan composición química y origen diferentes. Las partículas atmosféricas pueden ser emitidas por una gran variedad de fuentes de origen natural o antropogénico. Las partículas de origen natural derivan principalmente de suelos minerales (origen geológico), mientras las partículas de origen antropogénico son derivadas de la construcción de carreteras (asfalto, concreto, pintura), tráfico vehicular, desarrollo industrial, etc. El material particulado comúnmente conocido como polvo, consiste en partículas con un intervalo de 1 a 10 000 μm [45].

Dos clasificaciones apropiadas en base al tamaño de material particulado y tipo fuente de emisión se encuentran en la literatura. Por un lado, Meza-Figueroa [13] define el origen de las partículas que se encuentran contenidas en el intervalo de 0.1 a 1 μm como aquellas que provienen principalmente de procesos de la combustión (gasolina y cigarro) y aerosoles fotoquímicos (*smog*). Las partículas cuyo tamaño está comprendido entre 1 y 10 μm , procedentes de elementos del suelo, quema de basura y polvos emitidos por las industrias como cementeras y hornos industriales. Finalmente, las partículas mayores a 10 μm , como el resultado de procesos físicos como tolvaneras y trabajos de la construcción. Por su parte, la USEPA [44] menciona que las partículas respirables (menores a 2.5 μm) provienen principalmente del crecimiento y aglomeración de partículas en fase gaseosa. La mayoría de las partículas en fase gruesa (2.5-10 μm) se forman principalmente por

procesos mecánicos, como división y fracción; generalmente se originan de minerales finamente fraccionados, del suelo o del polvo. Por medio de estas clasificaciones es posible determinar el origen y formación del tipo de partículas. A continuación se presenta un análisis de la morfología de las partículas suspendidas [44].

2.1.2 Morfología de las partículas suspendidas

La determinación química y morfológica de materia en estado particulado se realiza con el propósito de determinar, por una parte, las características físicas (forma, tamaño, aspecto y textura) y por otra parte, la presencia de elementos o contaminantes específicos como metales, que permitan inferir la composición de las partículas, y de ser posible, destacar la presencia de marcadores específicos de origen.

El microscopio electrónico puede revelar detalles de la topografía de la superficie de cualquier material con una claridad y definición que no pueden obtenerse con ningún otro medio. Este instrumento es capaz de detectar distribución de potenciales superficiales, fenómenos de luminiscencia superficiales, conductividad subsuperficial, composición superficial y cristalografía. Esto con una distancia límite resolutive de menos de 50 nm (0.050 μm) y con una profundidad de foco 500 veces mejor que en un microscopio de luz transmitida (óptico) a ampliificaciones equivalentes. La técnica de microscopio electrónico de barrido (MEB) puede utilizarse sin dificultad con partículas mayores a 3 μm . Para examinar partículas más pequeñas deberá utilizarse la técnica de MEB de alta resolución o bien, microscopía electrónica de transmisión (MET) [46].

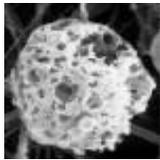
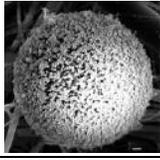
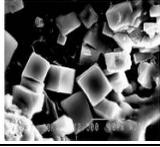
De acuerdo a estudios realizados con MEB [46, 47], las partículas naturales provienen principalmente del suelo, del mar y de grandes generadores de biomasa; sus características dependen del área geográfica donde se originan. Por esta razón, las partículas minerales naturales que se originan del suelo y forman parte del ambiente local poseen una estructura y composición muy diversa; sin embargo, usualmente presentan formas simétricas y muy estructuradas, como aquellas que provienen de la biomasa. Las partículas que provienen de procesos de cristalización en el mar, presentan estructuras básicas y regulares que dependen de la composición química del material, generalmente consisten en cloruros y cantidades pequeñas de sulfatos. Finalmente, las partículas que presentan forma ovoide, característica de las partículas naturales

fracturadas y con filos; o bien, aquellas que son muy viejas y se encuentran altamente erosionadas. Las partículas naturales están formadas principalmente por cloruros, sulfatos, sodio, potasio y magnesio [46, 47].

Por otra parte, las partículas minerales tienen una matriz de sílice, calcio o aluminio; las arcillas, calcitas y silicatos son muy abundantes en este grupo. Las partículas que se originan de la biomasa se caracterizan por una matriz de carbón y si son de origen vegetales, contienen clorofila y cloro. De igual manera también se encuentran esporas, hongos, virus, bacterias e incluso microfósiles, sin embargo se encuentran en pequeñas proporciones [47].

Umbría y colaboradores [47] propusieron en su trabajo una clasificación general de las partículas sólidas comunes, determinando las fuentes de origen natural o antropogénico de partículas atmosféricas. La información se presenta en el Cuadro 1 y forma parte de los primeros avances para la evaluación de la calidad del aire en términos de composición.

Cuadro 1. Clasificación de partículas atmosféricas de acuerdo a su morfología.
Obtenida de Umbría y colaboradores [47].

DENOMINACIÓN	CARACTERÍSTICAS	EJEMPLO
<p>a) Cenósferas Partículas esféricas con aspecto poroso y baja densidad (menor que el agua).</p>	Partículas de combustión, generalmente de combustibles fósiles. Con una matriz carbonosa y alto contenido de S. Pueden contener metales	
<p>b) Esféricas lisas Partículas esféricas con superficie lisa.</p>	Partículas de combustión, generalmente carbón mineral y matriz de Si y Al.	
<p>c) Esférica rugosa Partículas con diámetro cercano a 1 µm, con superficie rugosa</p>	Partículas de hornos de fundición. Compuestos principalmente por una gran cantidad de elementos metálicos en forma de óxidos.	
<p>d) Irregulares Partículas claramente definidas, similares a rocas o fragmentos de vidrios con picos o filos.</p>	Usualmente, provienen del suelo o emisiones. La matriz puede ser de Ca, Al o sus variantes.	
<p>e) Amorfas Partículas que no presentan una forma o apariencia definida.</p>	Formadas por agregados de otras pequeñas partículas. Varían en composición de acuerdo a su origen.	
<p>f) Cristalizaciones Presentan estructuras regulares y simetrías definidas.</p>	Pueden ser naturales o artificiales, provienen de sales disueltas que evaporan y forman los cristales. Generalmente son cloruros y sulfatos.	
<p>g) Biológicos Partículas Altamente estructuradas, con texturas complejas y distribuciones regulares.</p>	Partículas vegetales o animales, fosilizadas o no, fáciles de identificar. Basados principalmente en estructuras de C y en los fósiles, de Si	

2.2 Influencia de la meteorología

Se han llevado a cabo diversos trabajos en los que se da a conocer que los parámetros meteorológicos suelen tener influencia sobre la concentración de los contaminantes atmosféricos [48-50]. En estos trabajos se han analizado las concentraciones de contaminantes como PM_{10} y metales, así como las variaciones de los parámetros meteorológicos como precipitación pluvial, velocidad y dirección del viento.

Kumar y colaboradores [49] comentan que grandes cantidades de precipitación pueden alterar la densidad y distribución de tamaño de las partículas de los aerosoles de una manera más eficiente que la humedad relativa o la velocidad del viento.

El mecanismo de remoción de contaminantes durante periodos de lluvia depende del contenido de agua en la nube, de la duración, frecuencia y tipo de precipitación y de la distribución del tamaño de las partículas [49].

En este sentido se ha determinado que durante condiciones de calma (velocidad del viento inferior a 4 ms^{-1}), los contaminantes locales se acumulan y las concentraciones elementales se incrementan, mientras que altas velocidades de vientos favorecen la dispersión y el transporte de contaminantes emitidos de fuentes locales. Asimismo, la llovizna ligera propicia bajas concentraciones en partículas suspendidas y en elementos que provienen de emisiones vehiculares [48, 50].

Correa [48] supone en su modelo que la humedad relativa aumenta debido al efecto combinado del incremento de temperatura y el descenso de la velocidad del viento. Sin embargo, la pérdida de la humedad relativa también puede atribuirse a posibles alteraciones en el régimen hidrológico. En el mismo trabajo a través del modelo propuesto se indica que la velocidad del viento aumenta conforme incrementa la temperatura y que la concentración de las partículas es proporcional con el incremento de la humedad relativa. Estos resultados pueden explicarse debido a que las altas temperaturas tienden a generar corrientes de aire y por otro lado, se puede considerar alguna relación entre la humedad relativa y las partículas suspendidas, debido a que se considera que el agua en la atmósfera se encuentra en estado de vapor hasta que la

humedad relativa es total (100%) y el agua pasa a estado líquido. Es decir, el momento en el cual ocurre la condensación. Es importante mencionar que aunque estas teorías tienen un buen fundamento, nunca pudieron demostrarse en el modelo de Correa-García.

2.3. Inventario de emisiones atmosféricas

Los inventarios de emisiones son instrumentos indispensables que permiten visualizar el estado en el que se encuentra la calidad del aire, además de que influyen en la salud pública y política ambiental, local, regional, nacional e internacional. Debido a que el interés de este proyecto es evaluar a los geckos *Hemidactylus frenatus* y *Tarentola mauritanica* como posibles bioindicadores de material particulado del aire en dos regiones tropicales de España (Huelva) y México (Tamaulipas) a continuación se presentará el inventario de emisiones característico de las regiones de estudio.

2.3.1 Inventario de emisiones en Tamaulipas, México

En 1999, la SEMARNAT realizó el primer inventario nacional de emisiones en México, en el que reportaron las emisiones de monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x), compuestos orgánicos volátiles (COV), partículas PM₁₀ partículas PM_{2.5} y amoníaco (NH₃). El inventario incluye a Tamaulipas y clasifica la información en cuatro categorías de fuentes (fijas, de área, móviles y móviles que no circulan por la carretera). [51].

En el Inventario Nacional de Emisiones [51], se reporta que en Tamaulipas el 51% en peso de las partículas PM₁₀ son emitidas por diversas fuentes: combustión (uso de combustibles) industrial, comercial, doméstica y agrícola; uso comercial y doméstico de disolventes; recubrimiento de superficies; pintado de carrocerías; asfaltado; quema de residuos a cielo abierto, entre otras. Por otro lado, las fuentes fijas contribuyen con un 32 % en peso y las fuentes móviles con 14 % en peso de PM₁₀ en Tamaulipas. Un resumen de estas contribuciones se puede observar en el Cuadro 2. Las principales fuentes de emisión de NO_x, SO_x y NH₃ en el estado provienen de fuentes móviles que no circulan por carretera (pavimentadoras de asfalto, excavadoras, grúas, tractores, entre otras), seguido de fuentes fijas y fuentes de área, respectivamente (Cuadro 2). Por otro

lado, el Cuadro 3 muestra que las partículas PM_{10} son emitidas principalmente en el municipio de Cd. Madero con un 64% en peso de estas emisiones, seguido por las ciudades de Altamira y Tampico con un 24% y 11% en peso respectivamente.

Cuadro 2. Fuentes totales de emisión en Tamaulipas (SEMARNAT 2006 [51]).

FUENTE DE EMISION	NO _x		SO _x		COV		CO		PM ₁₀		PM _{2.5}		NH ₃	
	Mg-año ⁻¹	%												
Fuentes fijas	15,224	27	151,902	98	26,825	29	11,743	7	6,296	32	4,269	35		0
Fuentes de área	10,709	19	2,431	2	48,709	52	37,000	21	10,122	51	4,791	39	37,294	99
Fuentes móviles	12,271	22	699	0	14,714	16	113,634	65	587	3	538	4	220	1
Fuentes móviles que no circulan por carretera	18,337	32	236	0	2,596	3	11,141	6	2,678	14	2,596	21		-
Suma	135,991	-	155,267	-	559,191	-	173,518	-	19,683	-	12,196	-	37,514	-

Cuadro 3. Fuentes totales de emisión en la Zona Conurbada del Sur de Tamaulipas (SEMARNAT 2006 [51]).

FUENTE DE EMISION	NO _x		SO _x		COV		CO		PM ₁₀		PM _{2.5}		NH ₃	
	Mg-año ⁻¹	%												
Altamira	9,467	44	91,794	70	2,763	7	7,055	16	947	24	637	24	1,989	79
Madero	5,948	28	38,942	30	29,465	78	19,015	43	2,505	64	1,674	62	221	9
Tampico	5,870	28	904	1	5,522	15	17,898	41	445	11	373	14	316	13
Suma	21,285	-	131,640	-	37,750	-	43,968	-	3,898	-	2,685	-	2,525	-

2.3.2 Inventario de Emisiones en Huelva, España.

Basándonos en la revisión de Bolívar [52] de los procesos industriales de la zona, las actividades antropogénicas con posible influencia en los niveles y composición de las partículas en suspensión en Huelva se pueden resumir en:

- La industria de ácido fosfórico y derivados, puede contribuir a incrementar los niveles en aire ambiente de Ca^{2+} , PO_4^{-3} , F^- , SO_4^{-2} , Fe^{3+} y Cu^{2+} .

- Las actividades metalúrgicas están desarrolladas también y pueden contribuir a incrementar los niveles en aire ambiente de SO_2 , H_2SO_4 , As, Sb, Pb, Zn, Sn, y otros metales.
- La industria petroquímica puede estar contribuyendo a incrementar los niveles en aire ambiente de hidrocarburos, SO_2 , NO_x , NH_3 , Ni, y V.
- Otras actividades, como la producción de pigmentos de TiO_2 , y otros productos químicos e inorgánicos pueden generar emisiones atmosféricas de SO_2 , NH_3 , Cl, Na, Fe y diversos compuestos orgánicos.
- Las emisiones atmosféricas producidas por el procesamiento de la pasta de celulosa pueden contribuir a incrementar en el aire los compuestos orgánicos.
- Emisiones de una central térmica de gas y combustible pueden incrementar los niveles de hidrocarburos y nitratos.
- Típicas emisiones urbanas, principalmente de tráfico, características de una ciudad.

Un estudio realizado en la ciudad de Huelva durante el 2001 [53], muestra mediante un análisis factorial que las mediciones diarias de los componentes de PM_{10} , y $\text{PM}_{2.5}$ tienen su origen en 5 fuentes principales de material particulado en base a las actividades industriales de la zona; los perfiles químicos identificados se pueden atribuir a las siguientes fuentes:

Para PM_{10} :

1. Una fuente minera (31% de la varianza PM_{10}) compuesta mayoritariamente por elementos de origen como Al, Ca, Mn, Fe, K, Sr, Mg.
2. Una fuente marina (9% de la varianza de PM_{10}) compuesta por elementos típicamente marinos como Cl, Na y una fracción de Mg.
3. Una fuente mixta relacionada con las actividades metalúrgicas y de producción de fosfatos (20% de la varianza de PM_{10}) tal como se deduce de la asociación de Cu, PO_4^{3-} , Cd, Zn, As, y Pb. Esta asociación entre elementos emitidos por diferentes actividades industriales se debe a la proximidad de las diferentes plantas industriales de Atlantic Cooper y de producción de fosfatos (Fertiberia, Rodhia y Foret).

4. Una fuente relacionada con las emisiones de la industria petroquímica y Tioxide (% de la varianza de PM_{10}) como se deduce de la asociación entre Ni, Co, V, Ti, SO_4^{2-} , NH_4^+ .
5. Por último, una fuente (% de la varianza PM_{10}) relacionada con las asociación de C, NO_3^- , K, Cr, Rb, y V. Aunque no es posible identificar una fuente de emisión clara, el origen de estos elementos podría estar relacionado con las emisiones del tráfico.

Respecto a los componentes de $PM_{2.5}$ se pueden resaltar las siguientes diferencias en comparación con los PM_{10} :

- La fuente mineral explica sólo el 23% de la varianza de $PM_{2.5}$, el factor relacionado con Petroquímica-Tioxide explica el 12% de la varianza e incluye, como en PM_{10} , Co, Ti, Ni, V, el factor relacionado con tráfico explica el 8% de la varianza.
- La fuente marina no se identifica en $PM_{2.5}$. Los elementos típicamente marinos como Ca y Cl se incluyen en la fuente mixta relacionada con la actividad metalúrgica y la producción de fosfatos que explica el 26% de la varianza de $PM_{2.5}$. Esto se debe a que una fracción de estos elementos puede estar relacionada con las actividades industriales de producción de fosfatos.
- Además de las fuentes descritas se identifica una fuente (aerosoles secundarios) que explica el 6% de la varianza, relacionada con la presencia de sulfato y amonio, bien relacionados con el aporte de masas de aire envejecidas, de origen externo o bien resultado del envejecimiento de masas de aire previamente emitidas desde Huelva que son transportadas de nuevo hacia la ciudad.

En el Cuadro 4 se presentan los niveles de concentración promedio de elementos mayores y traza contenidos en PM_{10} obtenidos en Huelva durante Julio del 2001 y Junio del 2002 [53].

Cuadro 4. Niveles medios de concentración de elementos mayores y traza en PM₁₀ obtenidos en Huelva en el periodo 13/07/01 a 12/06/02. (Conserjería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía y CSIC, 2007 [53]).

Concentraciones ng/m ³	Huelva	Concentraciones μg/m ³	Huelva
Li	0.5	PM ₁₀	36.7
Sc	0.8	CO ₃ ²⁺	2.7
Ti	55	SO ₄ ²⁺	3.5
V	7	NO ₃ ⁻	2.2
Cr	3		
Mn	12		
Co	0.4		
Ni	4		
Cu	50		
Zn	30		
Ge	0.7		
As	3.2		
Se	1		
Sr	4		
Zr	3.7		
Nb	0.2		
Mo	12		
Cd	0.6		
Sn	2.1		
Sb	2.3		
Ba	23		
Ta	0.14		
Pb	20		

2.4. Metodologías empleadas para el monitoreo de emisiones atmosféricas

La necesidad de monitorear los contaminantes atmosféricos surgió en los años 50's y 60's, trayendo consigo un rápido desarrollo de metodologías para el muestreo y análisis de estos contaminantes en varios países. Basándose en la revisión de Martínez y Romieu [25], en marzo de 1963 se organizó el Comité Intersociedades Norteamericano (ISC, siglas en inglés) que agrupa a diferentes asociaciones americanas como la de Higiene Industrial, de Ingenieros Químicos, de Salud Pública, entre otras, con la finalidad de establecer y desarrollar métodos de muestreo y análisis de calidad de aire y publica, en 1972 el Manual ISC que contenía 57 metodologías.

En los años sesentas la Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (OECD, siglas en ingles), formó un grupo de trabajo encargado de desarrollar y estudiar metodologías para la medición de contaminantes atmosféricos. En 1969, la Organización Mundial de Salud (OMS), publicó una Guía de Selección de Metodologías para la Medición de Contaminantes Atmosféricos. Siguiendo a esta publicación, un manual de laboratorio titulado *Métodos Selectos de Medición de Contaminantes Atmosféricos*, publicado en 1976 bajo el patrocinio del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y de la OMS [25, 54].

En los últimos años se han implementado técnicas de instrumentación que involucran métodos fotométricos y quimiluminiscentes, absorción atómica, infrarroja y ultravioleta, espectrometría de masas, cromatografía, activación de neutrones no-destructiva, el uso de electrodos selectivos, rayos X, fluorescencia y espectroscopia. También, se han desarrollado instrumentos de control remoto que sirven para medir contaminantes gaseosos y aerosoles en la tropósfera y en la estratósfera. Las metodologías para muestreo dentro del monitoreo atmosférico pueden ser divididas en cinco tipos genéricos:

1.- Medidores Pasivos

Estos dispositivos de toma de muestra, generalmente con forma de tubo o disco, colectan un contaminante específico por medio de su adsorción y absorción en un sustrato químico seleccionado. Después de su exposición por un apropiado período de

muestreo, que varía desde un par de horas hasta un mes, la muestra se regresa al laboratorio, donde se realiza la desorción del contaminante y después se le analiza cuantitativamente. Las principales ventajas del muestreo pasivo son su simplicidad y bajo costo, por lo que se pueden extender muchas unidades para que provean información en cuanto a la distribución espacial de los contaminantes. Debido a su simplicidad y bajo costo, las técnicas de muestreo pasivo son adecuadas para muchas aplicaciones, ya sea por sí mismas o en combinación con analizadores automáticos. Existen varias técnicas de muestreos pasivos disponibles o en desarrollo para los principales contaminantes urbanos, entre las que se incluyen las de NO₂, SO₂, NH₃, VOC's, y O₃. Entre los muestreadores pasivos hay que diferenciar los que específicamente se utilizan en puntos fijos de muestreo, para monitorear calidad de aire, especialmente para estudios de fondo y muestreos de amplia cobertura espacial; y los pasivos personales, que la gente puede llevar puestos y se utilizan principalmente en estudios epidemiológicos, donde se puede determinar, por ejemplo, la exposición personal durante una jornada de 8 horas de trabajo a un determinado contaminante [25, 54].

2.- Muestreadores Activos

A diferencia de los muestreadores pasivos, los muestreadores activos requieren energía eléctrica para bombear el aire a muestrear a través de un medio de colección físico o químico. El volumen adicional de aire muestreado incrementa la sensibilidad, por lo que pueden obtenerse mediciones diarias promedio. Los muestreadores activos más utilizados actualmente son los burbujeadores acidimétricos para medir SO₂, el método de filtración para PST de la OECD y el método gravimétrico de Altos Volúmenes (High Vol.) para partículas totales y fracción respirable de la EPA. También, existen técnicas de muestreos activos disponibles para la mayoría de los contaminantes gaseosos, como el método de Saltzman para NO₂ y el método NBKI (*Neutral Buffered Potassium Iodide*, solución amortiguadora neutra de yoduro de potasio) para O₃; sin embargo, la mayoría de estas técnicas han sido reemplazadas por analizadores automáticos. De cualquier manera para la investigación de aerosoles y gases ácidos se están usando filtros empacados y sistemas "Denuder". Los muestreadores activos son costosos en su adquisición y mantenimiento, también son más complejos que los muestreadores pasivos, pero son relativamente fáciles de operar,

confiables y han proporcionado la base de datos de mediciones en la mayor parte del mundo a lo largo de más de quince años. La continuidad de esta base de datos es muy importante para poder deducir tendencias a largo plazo [25, 54].

3.- Analizadores o Monitores Automáticos

A pesar de las ventajas económicas de los muestreadores activos o pasivos, existen aplicaciones de monitoreo que necesitan de la rápida respuesta, en horas o menor, que proporciona un analizador automático; por ejemplo, cuando se pretenden detectar valores máximos de concentraciones de contaminantes y situaciones de alerta para implementar medidas de contingencia. Estos instrumentos se basan en propiedades físicas o químicas del gas que va a ser detectado continuamente, utilizando métodos optoelectrónicos. El aire muestreado entra en una cámara de reacción donde, ya sea por una propiedad óptica del gas que pueda medirse directamente o por una reacción química que produzca quimiluminiscencia o luz fluorescente, por medio de un detector se produce una señal eléctrica proporcional a la concentración del contaminante muestreado. La gran capacidad de estos monitores automáticos se obtiene a expensas de los altos costos que implica su inversión inicial y su operación. Estos instrumentos tienden también a ser más susceptibles a problemas técnicos en comparación con los muestreadores, cuando no se cuenta con los programas de mantenimiento adecuados y con personal técnico calificado, ya que requieren de técnicos especializados para la operación rutinaria de los equipos y de métodos más sofisticados de aseguramiento y control de calidad. Estos monitores automáticos producen gran cantidad de datos que usualmente necesitan de sistemas telemétricos para su recopilación y computadoras para su subsecuente procesamiento y análisis [25, 54].

4.- Sensores Remotos

Los sensores remotos, a diferencia de los monitores automáticos, que proporcionan mediciones de un contaminante en un punto en el espacio, pueden proporcionar mediciones integradas de multicomponentes a lo largo de una trayectoria específica en la atmósfera (normalmente >100 m), y sistemas más complejos, pueden hasta proveer mediciones con intervalos de resolución a lo largo de la trayectoria. Se han llegado a detectar, por ejemplo, hasta 5 ppb de SO₂, en un patrón de 1 km. Sistemas

móviles pueden proporcionar mapas tridimensionales detallados de concentraciones de contaminantes dentro de un área por un período de tiempo limitado.

Algunos de estos controles remotos se han llevado a cabo por medio de instrumentos montados en aviones o en satélites, cuyos métodos incluyen el uso de correlaciones espectrométricas, el reflejo de la luz solar en las partículas de los aerosoles, absorción infrarroja y emisión espectroscópica, láser de color y de inducción infrarroja fluorescente y la aplicación de técnicas astronómicas. Las aplicaciones de los sensores remotos son muy especializadas, particularmente, se utilizan para investigaciones cerca de las fuentes de emisión, en las plumas de las chimeneas y para mediciones verticales de contaminantes gaseosos y aerosoles en la atmósfera, como la investigación de la distribución del ozono en la tropósfera y en la estratósfera. Sin embargo, desde un punto de vista comercial son instrumentos muy caros y extremadamente complejos y presentan, además, dificultades con la validación de sus datos, niveles de confianza y calibración. Se requiere de un gran esfuerzo especializado y cuidadoso control de calidad para operar exitosamente estos sistemas y producir datos confiables [25, 54].

5.- Bioindicadores

Recientemente, se ha mostrado gran interés en el uso de bioindicadores para estimar algunos factores ambientales, entre los que se incluyen la calidad del aire, particularmente en la investigación de sus efectos. El término biomonitoreo, (el cual ha implicado generalmente el uso de plantas para monitorear el aire) cubre una multitud de muy diferentes muestreos y enfoques de análisis con muy diferentes grados de sofisticación y desarrollo. Los métodos incluyen:

- Uso de la capacidad de los organismos para acumular contaminantes o sus metabolitos en el tejido.
- Estimación de los efectos de los contaminantes en el metabolismo o en la información genética. En este caso, la colección y análisis requiere de técnicas sofisticadas.
- Estimación de los efectos de los contaminantes en la apariencia de los organismos. La estimación puede llevarse a cabo en el campo por expertos y no se necesitan análisis de laboratorio.

- Distribución y análisis de los organismos específicos como indicadores de calidad del aire, como el tipo y distribución para estimar los efectos fitotóxicos totales de la contaminación del aire. Este tipo de estimación se lleva a cabo en el campo por expertos y no se requiere análisis de laboratorio.

A pesar de que se han desarrollado guías sobre las metodologías de los bioindicadores, todavía existen problemas en la estandarización y armonización de estas técnicas. Algunos de los problemas son inherentes a los procedimientos y otros se deben a limitaciones por los organismos que pueden ser empleadas en diferentes regiones. En general, mientras menor sea la variación climática entre los sitios de las áreas de muestreo, será más fácil que se pueda desarrollar una técnica estandarizada que permita una comparación de datos significativa. De cualquier manera, hay variables cuyos efectos son difíciles de determinar, por ejemplo los efectos de los factores bióticos de estrés (calor, sequías, etc.) o la adaptación a ambientes contaminados [25, 54].

En el Cuadro 5 se presenta una comparación de las diferentes metodologías en cuanto a sus ventajas y desventajas, se hace mención de la inversión inicial y no contempla el costo por análisis de laboratorio [54].

Cuadro 5. Comparación de las diversas metodologías utilizadas para el monitoreo de la calidad del aire (Martínez y Romieu 1997 [25]).

Metodología	Ventajas	Desventajas	Inversión (US Dls)
Muestreadores Pasivos	Muy bajo costo. Muy simples. Útiles para cribado y estudios de base	No probado por algunos contaminantes. En general, sólo proveen promedios semanales y mensuales. Requieren análisis de laboratorio	\$2-4 por muestra
Muestreadores Activos	Bajo costo. Fáciles de operar. Confiables en: operación y funcionamiento. Historia de base datos	Proporcionan concentraciones pico o de alerta. Trabajo intensivo. Requieren análisis de laboratorio	\$2,000-\$4,000 por unidad
Monitores Automáticos	Alto funcionamiento comprobado. Datos horarios. Información en tiempo real y bajos costos directos	Complejo. Caro. Requieren técnicos calificados. Altos costos periódicos de operación	\$10,000-\$20,000 por monitor
Sensores remotos	Proporcionan patrones de resolución y de datos. Útiles cerca de fuentes y para mediciones verticales en la atmósfera. Mediciones de multicomponentes	Muy complejos y caros. Dificiles de operar, calibrar y validar. No son siempre comparables con los analizadores convencionales.	> \$200,000 por sensor
Bioindicadores	Baratos. Útiles para identificar la presencia de algunos contaminantes	Problemas en la estandarización de sus metodologías y otros inherentes a los procedimientos. Algunos requieren análisis de laboratorio.	Costo variable

CAPÍTULO III. ANTECEDENTES

3.1 Bioindicadores

Por ser el interés de este trabajo de investigación, a continuación se mencionarán las investigaciones más sobresalientes relacionadas al proyecto y concretamente, al uso de bioindicadores para el monitoreo de la calidad del aire. Es necesario mencionar que el uso de organismos para valorar la contaminación ambiental, se ha incrementado notablemente durante las últimas décadas debido a que éstos son capaces de acumular y percibir contaminantes en su anatomía, características indispensables para funcionar como bioindicadores.

Los primeros estudios de bioindicadores datan de los años 1960s. Pero fué hasta fines de los años 1970s que se establecieron teorías para considerar a un organismo como posible bioindicador [32]; en estos años, Stöcker y Phillips [55-57] definieron las características generales que deben tomarse en cuenta para considerar a un organismo como un bioindicador entre las que destacan:

1. Acumular y/o percibir los contaminantes.
2. Tener una amplia distribución geográfica.
3. Ser abundantes, sedentarios o de escasa movilidad, que sean representativos del área de recolección.
4. Estar disponibles en la mayor parte del año, para la recolección de suficientes muestras para análisis.
5. Ser fácilmente recolectables y resistentes a las condiciones del laboratorio, así como para ser usados en estudios de absorción de contaminantes en laboratorio si fuese necesario.
6. Tener una correlación simple entre las cantidades de contaminantes contenidos en el organismo y las concentraciones promedio de los contaminantes emitidos en el área de muestreo.
7. Tener la misma correlación del nivel del contenido del contaminante con el ambiente circundante en cada sitio estudiado bajo cualquier condición. Esto debe cumplirse para todos los organismos examinados.

En 1997, Kirschbaum y Wirth [58] definen a los bioindicadores como aquellas especies vegetales o animales, que debido a características ecológicas, reaccionan a un agente contaminante por una modificación clara y específica de sus funciones vitales.

Como es de esperarse, se requiere una referencia apropiada de los niveles de contaminación en un ecosistema cuando se tiene considerado realizar estudios de monitoreo biológico, que incluyan:

- i. Evaluar el estado de conservación o degradación.
- ii. Predecir el índice de posibles actividades humanas para establecer la necesidad de intervención.
- iii. Control de la evolución en tiempo, usando programas de monitoreo, si es necesario.

Al respecto, Cecchetti y Conti [59] reportan que esta evaluación puede ser interpretada en diferentes rutas como lo son: pre-industriales (producto de actividades humanas), niveles naturales (las condiciones promedio de un área o región donde puede haber actividades humanas, pero donde el lugar continúa en buen estado de conservación), niveles estándar (basadas en referencias geográficas globales), y los niveles cero (la concentración de un elemento en el ambiente o en el organismo previo al desarrollo de una actividad en particular que es independiente del grado de conservación). Derivado de las características que presentan diferentes organismos para su funcionamiento como bioindicadores, se han utilizado de manera cualitativa para la determinación de factores ambientales generados por actividades humanas (biomonitores cualitativos) y en forma cuantitativa para la determinación de contaminantes, llamados biomonitores sensitivos. Los biomonitores sensitivos son utilizados de manera visual al utilizarse como integradores del estrés causado por contaminantes y como sistemas de alarma preventiva. Usualmente, estos organismos presentan cambios morfológicos, relacionando su comportamiento a los aspectos físicos y químicos del ambiente, o como la alteración en los sistemas fotosintéticos o respiratorios.

En un trabajo posterior, los mismos autores reportan que cierto tipo de organismos presentan una acumulación de contaminantes en su tejido debido a una lenta metabolización y excreción, por lo que podrían ser utilizados de manera eficiente como biomonitores cualitativos para la medición de los contaminantes ambientales [26]. Se

han utilizado biomonitores acumulativos de plantas y animales, enfocados a determinar contaminantes en suelo, agua y, en menor proporción, en contaminación atmosférica. Entre los estudios realizados en suelos utilizando bioindicadores se pueden encontrar a los invertebrados [28, 30], agentes microbianos [60-63], macroinvertebrados [64-65] entre otros. Por su parte, los indicadores biológicos utilizados para el análisis de los cuerpos de agua son muy variados entre los que podemos encontrar algas [27, 29], macroinvertebrados [66], bivalvos [67-69], peces [70-71], etc.

Los bioindicadores reportados hasta el momento para realizar monitoreo atmosférico son relativamente pocos. En general, se han propuesto para este fin algunos musgos y líquenes ya que la mayor parte de sus nutrientes los obtienen del agua de lluvia y del polvo [26, 31-33]. También se han propuesto hojas de plantas [72], hojas de pino [73-74] y aves [75, 76].

Durante las últimas dos décadas, el uso de diversas clases de animales como bioindicadores de contaminantes en suelo, aire y agua se han ido incrementando, pero hasta la fecha son muy escasos los estudios realizados en reptiles, probablemente atribuido a la dificultad de estudiar a las especies ya que en su mayoría presentan un comportamiento defensivo (violento) durante la captura y el número de muestras requerido para su estudio suele ser grande [77]. Los pocos estudios reportados al respecto muestran una interesante perspectiva para su uso como bioindicadores. Entre los estudios realizados a reptiles encontramos cocodrilos [34], tortugas [35, 36], serpientes [38, 39], lagartijas [77, 78, 79, 80]. Sin embargo, estos estudios se han utilizado para determinar la contaminación en suelo y agua. Hasta la fecha, se desconocen estudios en los que se utilicen reptiles como indicadores de contaminación atmosférica. En este trabajo de investigación se propone el estudio de dos especies de reptil, los geckos *Hemidactylus frenatus* en el noreste de México y *Tarentola mauritanica* en el suroeste de España como bioindicadores de metales pesados en material particulado del aire en zonas urbanas. A continuación, se presentan las características más importantes que se han reportando en la literatura de las especies propuestas.

3.2 Hemidactylus frenatus.

Para la realización de este estudio llevado a cabo en la zona costera noreste de México, se planteó utilizar una especie de reptil introducido o exótico como bioindicador de metales, no metales y metaloides en material particulado del aire (Figura 1).

Información taxonómica

Reino: ANIMALIA

Phylum: CHORDATA

Clase: REPTILIA

Orden: SQUAMATA

Familia: GEKKONIDAE

Nombre científico: *Hemidactylus frenatus* (Schlegel, 1836)

Sinónimo: *Hemidactylus nigriventris*

Nombre común: Bridled house gecko, house gecko (Inglés).

Salamanquesa, cuija, besucona (Español).



Figura 1. *Hemidactylus frenatus*

Estos geckos fueron probablemente introducidos en México por el puerto de Acapulco, por barcos que transportaban mercancía. Estos reptiles provenían de islas que se encuentran en el Océano Pacífico, desconociéndose una fecha exacta de su introducción [78]. El *Hemidactylus frenatus* suele alcanzar una medida de 40 a 50 mm

de hocico-cloaca, la longitud de su cola varía de individuo a individuo, su coloración oscila de gris pálido a color canela, algunos presentan manchas oscuras, la superficie ventral es de color crema y no presenta patrones. Su cuerpo se encuentra cubierto por escamas granulares, las escamas ventrales son lisas, imbricadas y mucho más grandes que las escamas dorsales granulares. Presentan lámelas subdigitales expandidas y divididas [81].

En cuanto a su ciclo reproductivo, es una especie ovípara, activa reproductivamente a lo largo del año, las hembras suelen poner dos huevos por camada, varias veces al año, sin necesidad de apareamiento continuo ya que son capaces de almacenar el esperma por largos períodos de tiempo, su período de vida varía de 1 a 3 años. Estos reptiles presentan la particularidad de vocalizar, produciendo un sonido como si fueran pequeños besos repetitivos para atraer a sus posibles parejas de apareamiento y para hacer una marcación de su territorio [78]. Su dieta alimenticia está basada particularmente en insectos, esta actividad suelen realizarla durante la noche cuando su color se vuelve más claro permitiéndoles acercarse a las fuentes de luz donde obtienen con mayor facilidad su alimento. Es común verlos en congregaciones de varios geckos realizando esta actividad [80]. Este reptil se ha adaptado a la convivencia con el hombre, ubicando su hábitat en residencias y demás estructura urbana. Aunque han tenido una fácil adaptación a los grandes asentamientos humanos estos geckos aún siguen habitando las zonas rurales. El *Hemidactylus frenatus* se encuentra distribuido alrededor de los trópicos y subtrópicos. En México su distribución abarca los estados de Baja California, Campeche, Chiapas, Colima, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Querétaro, Quintana Roo, San Luis Potosí, Sinaloa, Tabasco, Tamaulipas, Veracruz y Yucatán [82].

Los criterios tomados en cuenta para seleccionar a este espécimen como bioindicador, es que son organismos fácilmente manipulables en campo y laboratorio. Su distribución está generalizada en los trópicos, comparten su hábitat con los humanos en zonas urbanas y rurales, además de ser una especie muy abundante e invasora en el nuevo mundo.

Su dieta alimenticia y su tipo de vida los hacen susceptibles a la acumulación de metales en su organismo, provenientes del polvo acumulado en la superficie de estructuras (casas, edificios, etc.) además de que tienen la particularidad de usar su lengua para limpiar su cuerpo. También la usan para atrapar partículas aromáticas del aire y así poder detectar a sus posibles presas y parejas de apareamiento, esta acción hace que las partículas suspendidas en el aire sean ingeridas [83, 84].

3.3. *Tarentola mauritanica*

En el estudio realizado en el sureste de España se empleó también un reptil introducido o exótico como bioindicador de metales, no metales y metaloides en material particulado del aire.

Información taxonómica

Reino: ANIMALIA

Phylum: CHORDATA

Clase: REPTILIA

Orden: SAURIA

Familia: GEKKONIDAE

Nombre científico: *Tarentola mauritanica* (Linnaeus, 1758)

Sinónimo: *Lacerta mauritanica*, *Ascalabotes mauritanicus*.

Nombre común: House gecko (Inglés)

Salamanquesa (Español).

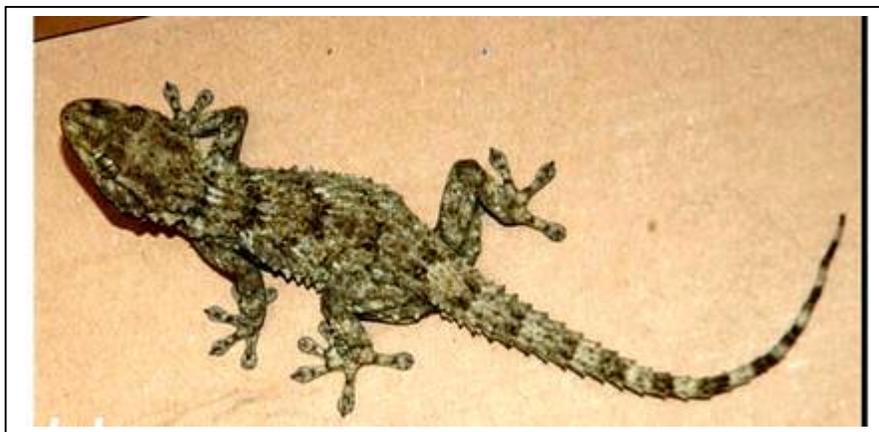


Figura. 2. *Tarentola mauritanica*

El estudio realizado por González de la Vega [85] comenta que estos gekos fueron introducidos desde África por la mano del hombre, desconociéndose la fecha exacta de su introducción. La *Tarentola mauritanica* es una especie robusta y relativamente grande, cuya longitud de cabeza y cuerpo puede alcanzar 86 mm y su longitud total 190 mm. La longitud de la cola intacta mide el 44.4-51.8% de la longitud total en recién nacidos y el 50.3-56.5% en adultos, esta especie tiene un periodo de vida de 3-5 años [85]. Posee 10-14 hileras de grandes tubérculos aquillados en el dorso, que están rodeados de otros tubérculos menores también aquillados. Partes inferiores con escamas hexagonales lisas. Dedos ensanchados lateralmente, sobre todo en su porción distal y comprimidos dorsoventralmente, con unas 12 laminillas subdigitales adhesivas no divididas por el centro. Coloración dorsal parda o gris con cuatro o cinco bandas transversales oscuras de forma irregular. Partes inferiores blanquecinas o amarillentas, iris grisáceo. La coloración general tiende a ser muy oscura durante el día y muy clara durante la noche [84-86].

Martínez-Rica [86] reportó que el período reproductivo tiene lugar durante la primavera, pudiendo extenderse a principios del verano, mientras que González de la Vega [85] menciona que el celo tiene lugar en Huelva en el periodo comprendido de marzo hasta julio. Su estrategia reproductiva consiste en depositar varias puestas con un número reducido de huevos a lo largo de la estación. Se citan 1-3 puestas al año por hembra en el campo, aunque debe haber flexibilidad en función de la disponibilidad de alimento pues en cautividad puede llegar hasta 7 puestas por hembra y por temporada. Cada puesta se compone de 1-2 huevos.

La producción de sonidos en forma de chillidos de tipos variados juega un importante papel en la comunicación entre individuos, especialmente durante la actividad nocturna. En la primavera los machos muestran comportamiento agresivo hacia otros machos, mostrando intolerancia espacial. Fuera de la temporada reproductiva hay mayor tolerancia entre individuos y se observa mayor proximidad entre éstos, llegando a hibernar juntos.

La dieta es muy variada e incluye numerosos grupos de invertebrados. Los grupos más importantes en todas las zonas donde se ha estudiado la dieta son coleópteros,

arácnidos, himenópteros, lepidópteros y larvas de insectos. Ocasionalmente, captura ejemplares jóvenes de lagartijas (*Podarcis lilfordi*, *Podarcis hispanica*) y de salamanquesas (*Hemidactylus turcicus*) incluyendo jóvenes de su misma especie [85, 87, 88]

El área de distribución de la especie se extiende por la región mediterránea, incluyendo el sur de Europa, islas mediterráneas y norte de África. Introducida en Uruguay, California (USA), Tenerife y la isla de Madeira [87]. Se ha encontrado, en 2003, en la isla de Alborán [90]. En la Península Ibérica se encuentra en el centro, sur y este. Ausente de la mayor parte de Galicia, Asturias, Cantabria, País Vasco, gran parte de Castilla y León (excepto el extremo oeste) y de las montañas del este peninsular. Presente en las islas Baleares [25, 88, 91, 92]. Generalmente se encuentra en altitudes bajas, desde el nivel del mar hasta los 600 m [93]. Este reptil es también una especie de carácter antropófilo, está presente en construcciones humanas (muros de separación de fincas, edificios, albercas, cisternas, etc.) incluso en pueblos y ciudades, [86, 88, 94, 95].

Los criterios tomados en cuenta para seleccionar a este espécimen como bioindicador, es que son organismos fácilmente manipulables en campo y laboratorio, su distribución está generalizada entre los subtropicos del viejo continente y del norte de África, comparten su hábitat con los humanos en zonas urbanas y rurales, además de ser una especie muy abundante. Su dieta alimenticia y su tipo de vida los hacen susceptibles a la acumulación de metales en su organismo provenientes del polvo acumulado en la superficie de estructuras como casas, edificios, etc. [83, 84].

CAPÍTULO IV. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se presenta la descripción de los sitios de muestreo para ambas especies de geckos utilizados, la metodología empleada para la colección de las muestras así como su preparación en el laboratorio. También, se describen los diferentes métodos usados para la extracción de los metales, además del procedimiento para el análisis de los metales por medio de los equipos ICP-MS. Finalmente se muestran los cálculos a utilizar y el análisis estadístico aplicado a los datos obtenidos.

4.1. Descripción de los sitios de muestreo.

4.1.1 México

La región de estudio comprende el extremo sureste del estado de Tamaulipas e incluye las ciudades de Tampico, Madero, Altamira y un área rural en el municipio de Aldama, así como el poblado de Tamos en el estado de Veracruz, México (Fig. 3).

Tres de los sitios seleccionados se encuentran cerca de medidores de alto volumen utilizados para el monitoreo de partículas PM_{10} . Un sitio más colinda a una fuente de emisión específica y el otro fue seleccionado como sitio de referencia lejos de emisiones atmosféricas significativas.

La región de estudio presenta un clima del tipo tropical sub-húmedo, cálido y extremo. La temperatura anual promedio es de 24 °C, la temperatura máxima promedio es de 36.8 °C, y la temperatura mínima promedio es de 9.7 °C, La precipitación anual varía de 788 a 1044 mm [96].

4.1.1.1 Tampico

Es el segundo puerto mercante más importante del Golfo de México, colinda al norte con la ciudad de Altamira, al sur con el Río Panuco, al este con la ciudad de Madero y al oeste con el poblado Moralillo, Veracruz. Se caracteriza por su intensa actividad portuaria y comercial. El municipio de Tampico cuenta con una población de 303,635 habitantes [96].

El área de muestreo de los geckos se localiza en el centro de la ciudad de Tampico, las coordenadas del sitio son 22°13'10.58" Norte y 97°51'32.36" Oeste. En esta zona es donde se concentra el tráfico vehicular que generalmente consiste en automóviles particulares y transporte público. Además, en este sitio está ubicado un medidor de alto volumen para el monitoreo de partículas PM₁₀.



Figura. 3. Zona de estudio del *Hemidactylus frenatus*

4.1.1.2 Madero

El municipio tiene una sola localidad que es Ciudad Madero. Colinda al norte con la ciudad de Altamira, al sur con el Río Pánuco, al este con el Golfo de México y al oeste con el municipio de Tampico. Este municipio tiene una población de 193,045 habitantes [96].

La ciudad de Madero tiene una gran actividad comercial, turística y petroquímica destacando la refinería “Fco. I. Madero” de PEMEX.

El sitio de muestreo se localiza en la colonia “Las Flores” por su cercanía a la refinería. Las coordenadas del sitio son 22°17'43.23" Norte y 97°50'15.39" Oeste. Allí se encuentra otro medidor de alto volumen para el monitoreo de partículas PM₁₀.

4.1.1.3 Altamira

Es un importante puerto marítimo industrial, aunque el puerto de Tampico sigue manejando toda la carga ligera. En Altamira se maneja todo lo concerniente a contenedores; además, se encuentra el corredor industrial, comprendido por industrias

dedicadas a actividades varias. La población de este municipio es de 162,628 habitantes [96]. El Municipio colinda al norte con el de Aldama; al sur con los de Madero y Tampico, así como con el Estado de Veracruz, al este con el Golfo de México y al oeste con el Municipio de González.

El sitio de muestreo se localiza en la colonia “Arboledas” por su cercanía al corredor industrial con coordenadas 22°23’19.82’’ Norte y 97°54’43.63’’ Oeste. Se encuentra a escasos mil quinientos metros de otro de los medidores de alto volumen para el monitoreo de partículas PM_{10} . Estos equipos cuentan con un radio de acción de aproximadamente tres mil metros.

4.1.1.4. Aldama

El municipio limita con Soto La Marina al norte, con Altamira al sur, al oeste con González y al este con Golfo de México. La economía de Aldama se basa en la agricultura, ganadería, pesca, el turismo por sus atractivos naturales y la minería, donde se explotan sal, fosforita, barita, etc. La población del municipio es de 27,676 habitantes [96].

El sitio de muestreo se encuentra localizado en el rancho “El Sabino Gordo” las coordenadas del área de muestreo son 22°44’43.61’’ Norte y 98°04’21.06’’ Oeste. Este sitio fue elegido como sitio de referencia, ya que se encuentra alejado de zonas urbanas y de fuentes de emisión con metales.

4.1.1.5 Tamos

Este poblado se encuentra en la porción norte del estado de Veracruz, colinda al norte con Tampico, Tamaulipas, al sur con Pánuco al oeste con Ébano, San Luís Potosí y al este con el municipio de Tampico Alto. Con una población de 5,900 habitantes. [96]

El sitio de muestreo está localizado en la zona centro del poblado, las principales actividades son la agricultura, ganadería y minería, se seleccionó este sitio por su cercanía a la compañía minera Autlán, productora de Ferro-Manganeso. Las coordenadas del área de captura son 22°13’9.14’’ Norte y 97°59’40.70’’ Oeste.

4.1.2 España

La región de estudio comprende las ciudades de Huelva y Bonares, así como la zona habitacional más cercana al sector industrial, en el estado de Andalucía, España.

La selección de estas zonas como región de estudio se debió a que en una de ellas se encuentra un medidor de PM₁₀, una más por su cercanía al sector industrial y la otra escogida como sitio de referencia.

La región de estudio está situada en la franja costera onubense, el clima de la ciudad es de tipo mediterráneo (de transición entre el subtropical y el templado) con influencia atlántica. Su régimen de temperaturas es de tipo marítimo, con una media anual de 19.2 °C lo que hace de esta zona una de las más cálidas de Europa y recibiendo 2.984 horas de sol anuales. El mes más caluroso es julio, superándose los 40 °C en varias ocasiones en verano. El mes más frío es enero, cuando las mínimas rondan los 7 °C y las máximas los 17 °C.

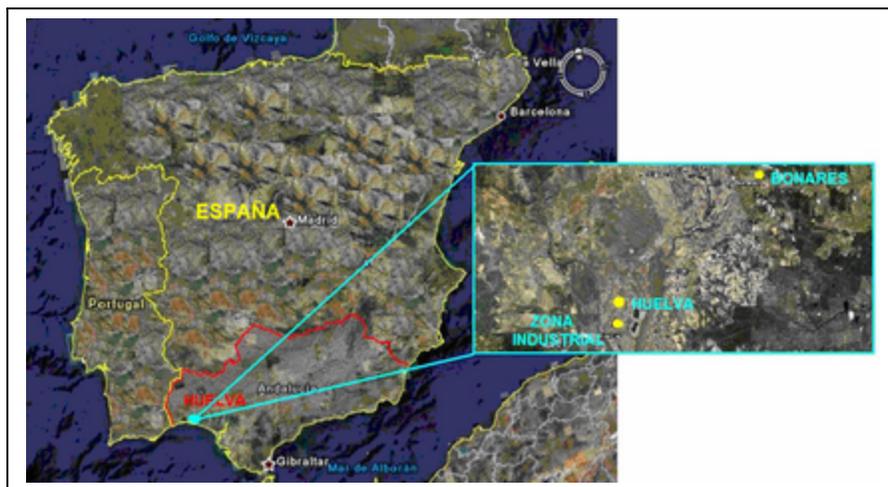


Figura. 4. Zona de estudio del *Tarentola mauritanica*.

4.1.2.1 Huelva

Situada en el extremo sur-occidental de España, Huelva forma parte de la región andaluza y se encuentra limitada al norte por la provincia de Badajoz, al sur por el Océano Atlántico, al este por Sevilla y Cádiz y al oeste por Portugal. Huelva ocupa una superficie de 148 Kilómetros cuadrados con una población actual que sobrepasa los 140,000 habitantes.

Las principales actividades económicas de la ciudad son las relacionadas con la industria química y la pesca. Además cuenta con un importante puerto pesquero, una amplia flota y secular tradición marinera.

El área de muestreo se encuentra localizada cerca de la Universidad de Huelva, coordenadas 37°16'4.96'' Norte y 6°56'2.06'' Oeste. Esta zona cuenta con una gran aglomeración del tráfico vehicular que, generalmente, consiste en automóviles particulares y transporte público.

4.1.2.2 Zona Industrial

En la actualidad, el Polo industrial, de más de 1,500 ha (aproximadamente la mitad de las empresas ubicadas en los terrenos de la capital), es uno de los complejos industriales (en su mayoría de giro químico) más importantes del país estando instaladas 16 empresas.

El sitio de muestreo se ubicó en la zona habitacional más cercana al área industrial, debido al impacto de contaminación que ésta puede tener por su cercanía a los focos de contaminación. Las coordenadas del sitio son 37°15'9.40'' Norte y 6°57'19.50'' Oeste.

4.1.2.3 Bonares

El núcleo urbano se encuentra localizado en la parte norte del término, con una altitud de 81 m sobre el nivel del mar y a una distancia de 30 km de la capital de la provincia. La economía de Bonares se puede catalogar fundamentalmente como agrícola, la base de la economía es la agricultura y concretamente la de regadío (fresas y frambuesas), la cual influye en los demás sectores; cuenta con una población de 5,762 habitantes.

El sitio de muestreo se encuentra localizado en el centro del pueblo, y fue elegido como sitio de referencia, ya que se encuentra alejado de fuentes importantes de emisión de contaminantes atmosféricos. Las coordenadas del sitio de muestreo son 37°19'31.84'' Norte y 6°40'53.89'' Oeste.

4.2. Captura de los geckos.

4.2.1 Hemidactylus frenatus

La colección de muestras se llevó a cabo en dos temporadas del 2007: la primera durante los meses Abril y Mayo, la segunda abarcó los meses de Agosto y Septiembre. Se realizó el muestreo durante estos meses ya que, durante la primavera y el verano, los geckos se encuentran más activos. Se capturaron 60 especímenes por cada sitio de muestreo (30 por temporada), procurándose recolectar los geckos de mayor tamaño, ya que a mayor tamaño y edad, implica mayor tiempo de exposición al medio ambiente y contaminantes.

Para capturar los reptiles, se insensibilizaron con un golpe producido por un elastómero, causándoles un aturdimiento momentáneo dando oportunidad a capturarlos con la mano. Acto seguido, se introdujeron en bolsas plásticas de sellado hermético y se sometieron a hipotermia profunda para la privación de sus funciones vitales. El transporte se realizó en una hielera. Los especímenes se almacenan a -20°C hasta su análisis.

4.2.2 Tarentola mauritanica

La recolección de las muestras se realizó en el verano del 2008, durante los meses de Junio y Julio, cuando los geckos se encuentran más activos. Se capturaron 9 especímenes en cada sitio de muestreo teniendo cautela en recolectar los reptiles de mayor tamaño. El método de captura y manejo fue similar al empleado para la especie *Hemidactylus frenatus*.

4.3 Preparación de muestras

4.3.1 Hemidactylus frenatus

Se registró el peso individual de los 60 especímenes capturados en cada sitio de muestreo y se formaron 2 grupos por sitio. Un grupo de 30 geckos se dividieron en 3 repeticiones de cada sitio de muestreo, se lavaron e intervinieron quirúrgicamente para la extracción del tracto digestivo. El otro grupo de 30 geckos se lavaron pero no se les extrajo el tracto. Acto seguido se colocaron en un horno a 60°C por un periodo de 72

horas para su deshidratación hasta peso constante. Transcurrido este tiempo, se enfriaron en un desecador y se registró el peso de todas las muestras. Después, los especímenes se trituraron en un molino de aspas hasta obtener una consistencia de un polvo fino, el cual se refrigeró hasta su análisis.

4.3.2 *Tarentola mauritanica*

El muestreo se realizó por sitios de interés, registrando el peso de cada uno de los 9 especímenes capturados por cada sitio de muestreo, para analizarlos individualmente. Los especímenes se lavaron e intervinieron quirúrgicamente para la extracción del tracto digestivo. Separadamente, se registró el peso de los cuerpos sin tractos digestivos y sin colas, tractos digestivos y colas.

Los especímenes, sus tractos y colas fueron colocados en un horno a 80 °C por un periodo de 72 horas para su deshidratación hasta llegar a peso constante. Transcurrido este tiempo, se colocaron en un desecador y se registró el peso. Acto seguido, fueron trituradas en un molino de ágata hasta obtener una consistencia de un polvo fino. Enseguida se introdujeron en frascos de plástico, refrigerándose hasta su análisis.

4.4 Extracción de metales.

4.4.1 Manejo de cristalería

Para la extracción de metales, se utilizaron tres metodologías con el fin de comparar la eficiencia de los métodos. Estos consistieron en el método de digestión abierta, uso del equipo de microondas O.I. Analitical modelo 7295 y el Multiwave 300.

Todo el material de cristalería utilizado para la extracción de los metales se sumergió en ácido nítrico al 10 % durante 24 horas. Transcurrido el tiempo, se removió el ácido nítrico y se les agregó ácido clorhídrico para que actuara por otro periodo de 24 horas. Finalizado el tiempo, se dejaron reposando con agua grado mili Q por 24 horas más, posteriormente, se secaron a temperatura ambiente.

Para la limpieza de los recipientes empleados en las digestiones abiertas, éstos se sometieron a una temperatura de 90 °C durante 24 horas en ácido nítrico al 50%. Se

removió dicho ácido y nuevamente se calentaron a 90 °C por 24 horas en ácido clorhídrico al 50%. Acto seguido se les extrajo el ácido clorhídrico y se dejaron reposando en agua grado mili Q por 24 horas a 90 °C, para finalizar se dejaron secar en estufa a 90 °C durante 4 horas.

Para el material utilizado en las digestiones donde se emplearon los equipos O.I. Analytical modelo 7295 y Multiwave 300, se aplicó el método de limpieza establecido en los equipos el cual consiste en agregar 6 mL para el primer equipo y 8 ml para el segundo de ácido nítrico ultrapuro, a una temperatura de 160 °C y una presión de 20 bar durante 15 minutos.

4.4.2 *Hemidactylus frenatus*

4.4.2.1 Extracción de metales con el microondas Multiwave 300

El método empleado para digerir las muestras en el equipo Multiwave 300 fue el de Oyster Tissue, programa integrado en el equipo, propuesto por la EPA (método 3052). Este programa emplea la digestión de tejido orgánico, para el cual se pesaron 0.4 g de muestra, incluyendo el material de referencia, añadiéndoles 4 mL de ácido nítrico ultrapuro y 2 mL de peróxido de hidrógeno. El tiempo de digestión fue de 20 minutos a una presión de 40 bar y una temperatura de 400 °C.

Una vez terminado el tiempo de digestión, las muestras se llevaron a evaporación para eliminar el ácido nítrico a 90°C hasta obtener un residuo seco, el cual fue recuperado en matraces volumétricos de 50 mL a una concentración del 2% de ácido nítrico y aforados con agua grado milli Q. Se vertieron en recipientes de plástico de doble tapón, refrigerándose hasta su análisis.

4.4.2.2 Extracción de metales con el método de digestión abierta

En este método se tomó 0.1 g de muestra y del material de referencia TORT-2, se les agregó 1.8 mL de ácido nítrico ultrapuro se calentaron en recipientes cerrados durante 24 horas a 90 °C; transcurrido este lapso, se les añadió 0.3 mL de ácido perclórico tapándose y calentándose una vez más por un período de 2 horas. Después, se

destaparon y se llevaron a evaporación a 180 °C aproximadamente 12 hr, hasta la obtención de un residuo seco.

Se observó que las muestras presentaban un color amarillo. Este color indica que hay presencia de materia orgánica, si ésta no es eliminada del todo, podría causar interferencia en el equipo ICP-MS. Se decidió realizar una segunda digestión a las muestras la cual consistió en agregar 1.8 mL de ácido nítrico ultrapuro, dejándose actuar en recipientes cerrados durante 30 minutos. Después, se llevaron a evaporación a 90 °C, posteriormente se añadieron 0.9 mL de ácido fluorhídrico, el cual actuó durante 30 minutos. Enseguida se evaporó a 90 °C; por último, se dejaron reaccionar durante 30 minutos más con ácido perclórico. Acto seguido, se evaporaron a 180 °C, hasta la obtención de un residuo seco, el cual se recuperó en matraces volumétricos de 50 mL preparándose a una concentración del 2% de ácido nítrico, utilizando para el aforo agua grado milli Q, se vertieron en recipientes de plástico de doble tapón, refrigerándose hasta su análisis.

4.4.3 *Tarentola mauritanica*

4.4.3.1 Extracción de metales con el microondas Multiwave 300

Una vez comparados los resultados entre los diferentes métodos de digestión de las muestras de *Hemidactylus frenatus*, se decidió realizar las digestiones para los especímenes de *Tarentola mauritanica* utilizando el equipo Multiwave 300. El método empleado para digerir las muestras en el equipo Multiwave 300 fue el de Oyster Tissue, ya que este programa establecido emplea la digestión de tejido orgánico, para el cual se pesaron 0.4 g de muestra incluyendo el material de referencia, añadiéndoles 4 mL de ácido nítrico ultrapuro y 2 mL de peróxido de hidrógeno, el tiempo de digestión fue de 20 minutos a una presión de 40 bar y una temperatura de 400 °C.

Una vez terminado el tiempo de digestión, las muestras se llevaron a evaporación para eliminar el ácido nítrico a 90°C hasta obtener un residuo seco, el cual fue recuperado en matraces volumétricos de 50 mL a una concentración del 2% de ácido nítrico y aforados con agua grado milli Q. Finalmente, se vertieron en recipientes de plástico de doble tapón, refrigerándose hasta su análisis.

4.5 Análisis de metales con el equipo ICP-MS

Se realizó el análisis de los metales mediante el equipo ICP-MS modelo HP 4500 de los Servicios Centrales de Investigación de la Universidad de Huelva. Antes de realizar los análisis de las muestras, el equipo se calibró con ayuda de una solución constituida por 10 ppb de Li, Y, Tl, obteniéndose un error inferior al 5% R.S.D. y valores que siempre superan las 1500 cuentas/ppb. Los parámetros de sintonía y una descripción de las soluciones estándar utilizadas en la calibración se muestran en el Apéndice A.

La secuencia de análisis consistió en: blanco, estándar de 1 ppb, estándar de 10 ppb, estándar de 50 ppb, solución monitor de 10 ppb, muestras, monitor, muestras, etc. El análisis regular de la solución monitor permite controlar cómo evoluciona la señal durante la ejecución de la secuencia y, en su caso, corregir la deriva sufrida por el equipo. El límite de detección para la mayoría de los elementos se sitúa en 0.05 ppm.

4.6 Recuperación de metales

Para obtener las recuperaciones de los metales y la validación del método, se utilizó el Material de Referencia Certificado (MRC, TORT-2). Este material contiene concentraciones conocidas de los metales Cu, Zn, Ni, Co, Cd, Mn y Cr. Lleva el mismo tratamiento que una muestra, es decir, se somete a un proceso de extracción de metales por medio de digestión ácida, la solución que resulta de este proceso es después evaluada por el ICP para determinar el contenido de metales.

La recuperación de metales se evalúa con un porcentaje de recuperación (% Rec), el cual se obtiene de la relación entre la concentración del metal determinada con el ICP y la concentración certificada de dicho metal en el material de referencia. La recuperación de metales ideal deberá estar comprendida entre 85% y 115%. La ecuación utilizada para determinar la recuperación de los metales se presenta a continuación:

$$\% \text{ Rec} = \frac{\text{Concentración MRC obtenida}}{\text{Concentración MRC certificada}} = 100 \pm 5\%$$

4.7 Análisis estadístico

Con el fin de verificar los postulados del Análisis de Varianza (normalidad, homogeneidad, independencia y aditividad), se realizó un análisis basado en pruebas paramétricas y no paramétricas utilizando el software XL-STAT (Addinsoft, USA). La primer prueba paramétrica efectuada fue la de normalidad con el test de Shapiro-Wilk verificando la desviación de los datos. Este test se aplicó a los datos sin transformación y con transformación logarítmica (\log_{10}). El resultado del test mostró que los datos sin transformación en su mayoría se ajustan a la normalidad (curva Gaussiana) para la especie *Hemidactylus frenatus* (ver anexo apéndice B). Los resultados de esta misma prueba para la especie *Tarentola mauritanica* mostraron que los datos transformados (\log_{10}) en su mayoría se ajustan a la normalidad (ver Apéndice B).

Por otro lado, para verificar la homogeneidad, independencia y aditividad (pruebas no paramétricas) se utilizó el test de Bartlett. El test se aplicó a los datos sin transformación y con transformación (\log_{10}). En este caso, los resultados para la especie *Hemidactylus frenatus* no muestran una diferencia significativa en los datos sin transformar, por lo que se analizaron estadísticamente en su forma original ($\mu\text{g/g}$) (ver anexo Apéndice C). Mientras que, para los resultados de la especie *Tarentola mauritanica* en general, se observa que la transformación logarítmica presenta el mejor ajuste para la mayoría de los casos, por lo que este tipo de transformación será utilizada para el tratamiento de datos de la especie *Tarentola mauritanica*. Los resultados del test de Bartlett para ambas especies se encuentran en el Apéndice C.

Después de verificar la normalidad, homogeneidad, independencia, aditividad y aplicar en su caso la transformación adecuada, se realizó un Análisis de Varianza (ANOVA) con la finalidad de verificar diferencias significativas entre los sitios de muestreo y el género de las especies para cada uno de los metales en estudio con un nivel de significancia de $p < 0.05$ (ver Apéndice D). Para los casos en los que aparecían datos significativos, se aplicó la prueba de separación de medias de Duncan. La prueba de Duncan se aplicó con un intervalo de confianza del 95%.

Correlaciones de Pearson fueron empleadas para examinar la similaridad en la acumulación de metales entre la cola y cuerpo con tracto digestivo en datos de *Tarentola mauritanica*. También se aplicaron correlaciones de Pearson para examinar las afinidades entre metales para la zona de estudio (todos los sitios combinados). Se aplicó un análisis de conglomerados, el cual está representado por un diagrama de árbol (dendrograma). Éste agrupa elementos de forma homogénea en función de similitudes o similaridades entre ellos. La medida de similaridades usada fueron las distancias euclídeas. De este modo, se obtiene una clasificación jerárquica de los datos de acuerdo a sus similaridades con la que es posible comprender la procedencia de la población. Entre menor sea la distancia euclídea de los grupos, mayor afinidad existe entre ellos. Esta prueba se realizó en ambas especies [112].

En el capítulo de resultados se habla de valores estadísticamente significativos, para lo cual es importante dar a conocer a qué nos referimos con esto. En estadística, un resultado se denomina estadísticamente significativo cuando es poco probable que haya sido debido al azar. Una "diferencia estadísticamente significativa" solamente significa que hay evidencias estadísticas de que hay una diferencia; no significa que la diferencia sea grande, importante, o significativa en el sentido estricto de la palabra.

El nivel de significancia es comúnmente representado por el símbolo griego α (alfa). Son comunes los niveles de significancia del 5%, 1% y 0.1%. Si un contraste de hipótesis proporciona un valor P (o *p*-value) inferior a α ($p\text{-value} < 0.05, 0.01$ y 0.001), la hipótesis nula es rechazada. El resultado es denominado como 'estadísticamente significativo'. Cuanto menor sea el nivel de significancia (valores de P pequeños), más fuerte será la evidencia de que un hecho no se debe a una mera coincidencia (al azar) [112].

CAPÍTULO V. RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1 Calidad en la extracción de los metales.

El proceso de extracción de los metales se evaluó mediante la digestión del material de referencia certificado TORT-2 (Matriz de Hepatopáncreas de Langosta, fabricado por el Instituto Nacional para Medidas Estándares, Ontario, Canadá) El material de referencia utilizado ha sido usado en diferentes investigaciones [97] para evaluar la calidad en las digestiones de 21 elementos traza en este tipo de geckos (*Tarentola mauritanica*).

El Cuadro 6 presenta los porcentajes de recuperación de metales obtenidos con los diferentes métodos de digestión utilizados. Los metales extraídos con el método de digestión abierta solo alcanzaron una recuperación máxima del 48.8%. Por otra parte, el método de digestión por microondas recuperó más del 85% para la mayoría de los metales. Debido a que un intervalo de recuperación aceptable en este tipo de análisis debe ser superior al 85% [79, 98, 99], es claro que la digestión por microondas es la más eficiente para realizar la digestión de muestras de tejido de geckos. Por esta razón, los datos obtenidos con el método por digestión abierta fueron descartados y en adelante solo se discutirán los datos obtenidos con el método de digestión por microondas.

Cuadro 6. Porcentaje de recuperación de metales en TORT-2.

METALES	PRIMERA PRUEBA DE DIGESTION EN MICROONDAS	SEGUNDA PRUEBA DE DIGESTION EN MICROONDAS	TERCERA PRUEBA DE DIGESTION EN MICROONDAS	PRIMERA PRUEBA DE DIGESTION ABIERTA	SEGUNDA PRUEBA DE DIGESTION ABIERTA	TERCERA PRUEBA DE DIGESTION ABIERTA
V	109.868	108.307	114.200	1.811	0.989	1.246
Cr	111.920	117.514	114.445	14.033	32.508	27.905
Co	113.799	114.479	117.586	1.562	7.808	5.623
Ni	108.913	109.028	109.544	7.945	48.869	29.635
Cu	103.990	106.689	112.895	1.425	1.764	2.094
Zn	111.158	111.270	116.772	1.398	1.210	1.357
As	99.668	100.994	111.398	1.160	0.726	0.800
Se	85.657	84.143	88.880	0.849	0.035	0.031
Sr	86.999	84.044	94.151	1.661	0.955	0.866
Mo	114.292	116.798	118.573	1.758	0.011	0.217
Cd	88.445	86.092	81.527	1.045	1.387	1.647
Pb	97.557	98.573	101.987	4.592	26.599	27.549
Mn	78.676	87.132	87.941	ND	ND	ND

Nota: ND= No determinado.

5.2 Hemidactylus frenatus.

Para esta especie fue imposible hacer diferencias entre géneros, ya que estos especímenes no presentan un claro dimorfismo sexual externo. Por lo tanto, los resultados se presentan y discuten sin mencionar este tipo de diferencias.

5.2.1 Concentraciones de metales en especímenes con y sin tracto digestivo

Las concentraciones de metales en el tejido de los reptiles con y sin tracto digestivo para cada sitio se presentan en los Cuadros 7 y 8, respectivamente. De manera general, se observaron mayores concentraciones de metales en los especímenes sin tracto digestivo. Las diferencias entre sitios solo fueron significativas en *H. frenatus* sin tracto digestivo para Ni y Zn. En cuanto al Mn, no presentó diferencias significativas entre sitios; sin embargo, es posible observar un claro contraste entre el sitio de referencia (Aldama) y los sitios con posible grado de contaminación (Fig. 5).

Los datos con tracto digestivo muestran diferencias significativas entre sitios para V, Ni, Cu y Zn. Además, para los metales como el Pb y el Cd cuyas concentraciones no fueron estadísticamente diferentes, puede apreciarse una clara diferencia entre el sitio de referencia (Aldama) y los sitios con fuentes de contaminación cercanas (Fig. 5). Para el Mn no hubo diferencia significativa y sus medias no presentan un patrón consistente.

La diferencia en acumulación de metales entre los individuos sin y con tracto digestivo, podría estar relacionado con el metabolismo de los geckos, ya que la mucosa intestinal retiene un gran porcentaje de los metales ingeridos. Esta absorción intestinal se caracteriza por una rápida acumulación del metal y una lenta transferencia hacia el sistema circulatorio [100]. Esto sugiere que la mucosa intestinal funciona como un filtro que limita la transferencia de los metales al torrente sanguíneo. Una vez que los metales han sido transferidos al sistema circulatorio, estos tienen una afinidad diferente en los órganos del cuerpo. Por ejemplo, algunos metales depositados en el hígado son enviados a través del ducto de la biliar hacia el intestino, donde un porcentaje es removido en las heces, y otro tanto es una vez más regresado al hígado por la circulación enterohepática [101]. Esta información es coherente con los resultados obtenidos en este estudio, donde las concentraciones de metales en el cuerpo completo

(con tracto) representan el total de los metales ingeridos en corto tiempo, así como los metales acumulados durante todo el tiempo de vida del gecko.

El resultado obtenido para el Mn que presenta un patrón consistente de acumulación en organismos sin tracto digestivo puede explicarse porque el Mn es rápidamente asimilado. Es probable entonces que el metal se acumule en mayor proporción en el cuerpo que en la cola y que el tracto digestivo [102]. En general, existe diferencia en la asimilación de metales entre especímenes con y sin tracto digestivo. El análisis de especímenes con tracto digestivo, es el más adecuado para su uso como bioindicador ya que representa el total de los metales ingeridos. La excepción fue el Mn en el que los resultados sin tracto digestivo son más adecuados para discriminar sitios.

Cuadro 7. Concentración de metales en tejido del *Hemidactylus frenatus* con tracto digestivo (Media, \pm desviación estándar, rango y resultados del test de Duncan, presentados en ($\mu\text{g/g}$), base seca).

	ALDAMA	TAMPICO	MADERO	TAMOS	ALTAMIRA
Pb	1.812 \pm 0.402	6.273 \pm 3.882	2.459 \pm 1.079	4.082 \pm 2.703	4.041 \pm 3.901
	1.365 - 2.144	1.809 - 8.855	1.694 - 3.693	2.176 - 7.175	1.758 - 8.545
	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)
V	0.210 \pm 0.081	0.301 \pm 0.063	0.414 \pm 0.226	0.549 \pm 0.114	0.537 \pm 0.026
	0.159 - 0.304	0.230 - 0.350	0.155 - 0.570	0.417 - 0.616	0.507 - 0.554
	(B)	(B)	(A)(B)	(A)	(A)
Ni	5.057 \pm 3.329	13.007 \pm 0.717	8.456 \pm 1.139	7.289 \pm 0.718	4.634 \pm 2.276
	1.624 - 8.270	12.189 - 13.530	7.292 - 9.567	6.633 - 8.057	2.028 - 6.234
	(B)(C)	(A)	(B)	(B)(C)	(C)
Cu	5.360 \pm 0.626	6.715 \pm 1.952	8.538 \pm 2.771	9.532 \pm 1.364	8.150 \pm 0.689
	4.896 - 6.072	4.904 - 8.782	5.427 - 10.743	8.436 - 11.059	7.363 - 8.648
	(B)	(A)(B)	(A)(B)	(A)	(A)(B)
Zn	77.436 \pm 9.555	77.517 \pm 8.527	77.157 \pm 6.286	81.218 \pm 8.284	59.622 \pm 5.966
	68.325 - 87.380	67.713 - 83.203	72.777 - 84.359	74.315 - 90.403	52.733 - 63-177
	(A)	(A)	(A)	(A)	(B)
Cd	0.006 \pm 0.009	0.027 \pm 0.022	0.037 \pm 0.006	0.075 \pm 0.084	0.038 \pm 0.033
	0.001 - 0.017	0.001 - 0.041	0.029 - 0.041	0.007 - 0.169	0.001 - 0.064
	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)
Mn	0.066 \pm 0.070	0.035 \pm 0.008	0.083 \pm 0.046	0.143 \pm 0.100	0.242 \pm 0.350
	0.022 - 0.146	0.028 - 0.044	0.029 - 0.110	0.045 - 0.244	0.037 - 0.647
	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)

Cuadro 8. Concentración de metales en tejido del *Hemidactylus frenatus* sin tracto digestivo (Media, \pm desviación estándar, rango y resultados del test de Duncan, presentados en ($\mu\text{g/g}$), base seca).

	ALDAMA	TAMPICO	MADERO	TAMOS	ALTAMIRA
Pb	8.920 \pm 6.325	3.104 \pm 3.036	3.522 \pm 2.603	1.329 \pm 0.437	3.930 \pm 4.595
	4.498 - 16.165	1.309 - 6.610	1.782 - 6.515	1.071 - 1.834	0.745 - 9.198
	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)
V	0.321 \pm 0.111	0.252 \pm 0.092	0.235 \pm 0.040	0.365 \pm 0.224	0.405 \pm 0.166
	0.195 - 0.404	0.173 - 0.353	0.188 - 0.261	0.197 - 0.619	0.214 - 0.516
	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)
Ni	3.420 \pm 1.216	10.135 \pm 6.368	6.830 \pm 2.693	11.303 \pm 5.016	5.994 \pm 1.618
	2.687 - 4.824	5.695 - 17.431	3.764 - 8.809	8.198 - 17.089	4.654 - 7.792
	(B)	(A)(B)	(A)(B)	(A)	(A)(B)
Cu	9.429 \pm 2.520	5.947 \pm 2.684	9.034 \pm 2.536	6.872 \pm 1.693	6.612 \pm 0.829
	7.578 - 12.299	3.621 - 8.884	6.262 - 11.238	5.028 - 8.354	6.060 - 7.565
	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)
Zn	111.494 \pm 19.164	77.344 \pm 3.036	70.464 \pm 5.225	69.219 \pm 5.719	71.475 \pm 11.321
	89.994 - 126.777	75.569 - 80.850	64.824 - 75.139	63.478 - 74.915	61.547 - 83.804
	(A)	(B)	(B)	(B)	(B)
Cd	0.039 \pm 0.016	0.001 \pm 0.000	0.001 \pm 0.000	0.007 \pm 0.008	0.036 \pm 0.047
	0.021 - 0.052	0.001 - 0.001	0.001 - 0.001	0.001 - 0.016	0.001 - 0.090
	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)
Mn	0.024 \pm 0.003	0.045 \pm 0.028	0.061 \pm 0.069	0.099 \pm 0.093	0.070 \pm 0.049
	0.022 - 0.028	0.022 - 0.077	0.018 - 0.140	0.030 - 0.204	0.041 - 0.126
	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)

5.2.2. Diferencias entre sitios de muestreo.

En la Figura 5, se muestran las concentraciones de cada metal analizado (con tracto digestivo Pb, V, Ni, Cu, Zn y Cd, sin tracto digestivo Mn) en la que podemos observar claras diferencias entre sitios.

Como se esperaba, los especímenes del sitio de referencia (Aldama) presentaron las concentraciones más bajas para los metales Pb, V, Cu, Cd y Mn. La excepción fueron las concentraciones de Ni y Zn. La concentración de Zn podría atribuirse a que los geckos se colectaron alrededor de edificaciones con techo de lámina galvanizada, y el Zn identificado puede provenir de esta fuente [103]. Estudios realizados anteriormente mencionan que el Zn es adsorbido por las proteínas interfiriendo con el

proceso de desintoxicación de los organismos [97]. Por otro lado, el Ni en este sitio puede ser de origen geogénico, ya que el área de muestreo es completamente rural, el níquel presente en el aire se encuentra adherido fuertemente a las partículas de polvo y de tierra; el Ni puede estar acumulando mediante el contacto con la tierra levantada por el aire. El suelo generalmente contiene entre 4 y 80 partes por millón de níquel. [74, 104]. Las bajas concentraciones de metales acumulados en los geckos de este sitio demuestran que ésta es un área adecuada para utilizarla como sitio de referencia.

Los organismos colectados en Tamos, presentan las concentraciones más elevadas para los metales V, Cu, Zn, Cd y Mn, y el segundo más elevado para Pb (Fig. 5). Altas concentraciones de V podría indicar la combustión de aceites y combustibles, así mismo, las altas concentraciones de Pb pueden atribuirse al tráfico vehicular de la zona [14, 105]. Adyacente al sitio de muestreo opera una compañía minera que procesa mineral de ferromanganeso, lo cual es la causa más probable de las altas concentraciones de Mn en los geckos de este lugar. Así mismo, el contenido elevado de Cu y Zn se relaciona con las emisiones de incineradores y hornos de fundición, probablemente por los encontrados en esta misma compañía. [74, 105]. El Cd se presenta en general en concentraciones bajas para todos los sitios de estudio. Aunque las diferencias no son estadísticamente significativas entre sitios, es posible observar un claro contraste (Fig. 5), ya que la concentración es 12 veces mayor que la del sitio de referencia. Esta concentración elevada de Cd, podría deberse a las actividades realizadas en la compañía minera, ya que es la única actividad industrial en esta zona, normalmente el Cd está relacionado con actividades industriales [15].

Por otro lado, la ciudad de Tampico, zona urbana con alto tráfico vehicular, presenta las concentraciones más elevadas de Pb y Ni. En los geckos, estos metales se pueden atribuir a los procesos de combustión generados por el tráfico vehicular [15]. Las concentraciones de los demás metales tienen valores intermedios con respecto a los demás sitios con excepción del sitio de referencia que presenta las menores concentraciones.

Algunas refinерías emiten metales como V y Ni, lo cual sugiere que las concentraciones de éstos en Ciudad Madero podrían asociarse a los diversos procesos de

combustión en la refinación del petróleo [74, 106]. Como se ha mencionado, adyacente al sitio de muestreo se ubica una refinería, la cual se puede considerar como la fuente emisora de estos contaminantes.

La zona industrial se ubica en la ciudad de Altamira. Este sitio presenta las segundas concentraciones más altas para Cd, V y Mn, asociados a actividades industriales [15]. Este sitio presenta concentraciones significativamente bajas de Zn, con respecto a los de más sitios, esto puede deberse a que el área de muestreo de los geckos es una zona de viviendas nuevas en las que el material galvanizado no es un componente en estas edificaciones. De manera general puede observarse (Fig. 5) que las concentraciones de Zn son muy similares para los demás sitios (Aldama, Tampico, Madero y Tamos). Esto puede deberse a que en las áreas de captura de los geckos la mayoría de las edificaciones contienen techos de lámina galvanizada. Este metal es absorbido por las proteínas interfiriendo con el proceso de desintoxicación de los organismos [103, 97].

En general, los geckos del sitio de referencia presentan las menores concentraciones para la mayoría de los metales, indicando que es factible utilizar este sitio como referencia para nuestro modelo de indicador biológico. El poblado de Tamos resultó ser el más afectado al presentar las concentraciones más elevadas para cinco de los siete metales analizados. La compañía minera ubicada en este sitio parece ser responsable de estos niveles elevados, al ser la única industria ubicada en este lugar que genera emisiones. El municipio de Altamira donde se encuentra el área industrial presenta concentraciones intermedias para metales que podrían estar siendo emitidos en la zona industrial. Esto podría deberse a que en el sitio de muestreo, aunque cercano a las industrias, los vientos dominantes son del este-sureste la mayor parte del año, alejando la pluma de contaminantes de la zona donde se realizó el muestreo [18]. La acumulación de metales en geckos de los municipios de Madero y Tampico, demuestran que estas áreas están siendo afectadas por emisiones de la refinería y tráfico vehicular, respectivamente.

Esta información demuestra que por medio de esta especie (*Hemidactylus frenatus*) es posible identificar diferencias significativas en la concentración de metales

entre sitios y que estos metales acumulados en tejido de los geckos están relacionados con las fuentes de emisión específicas en cada sitio de estudio.

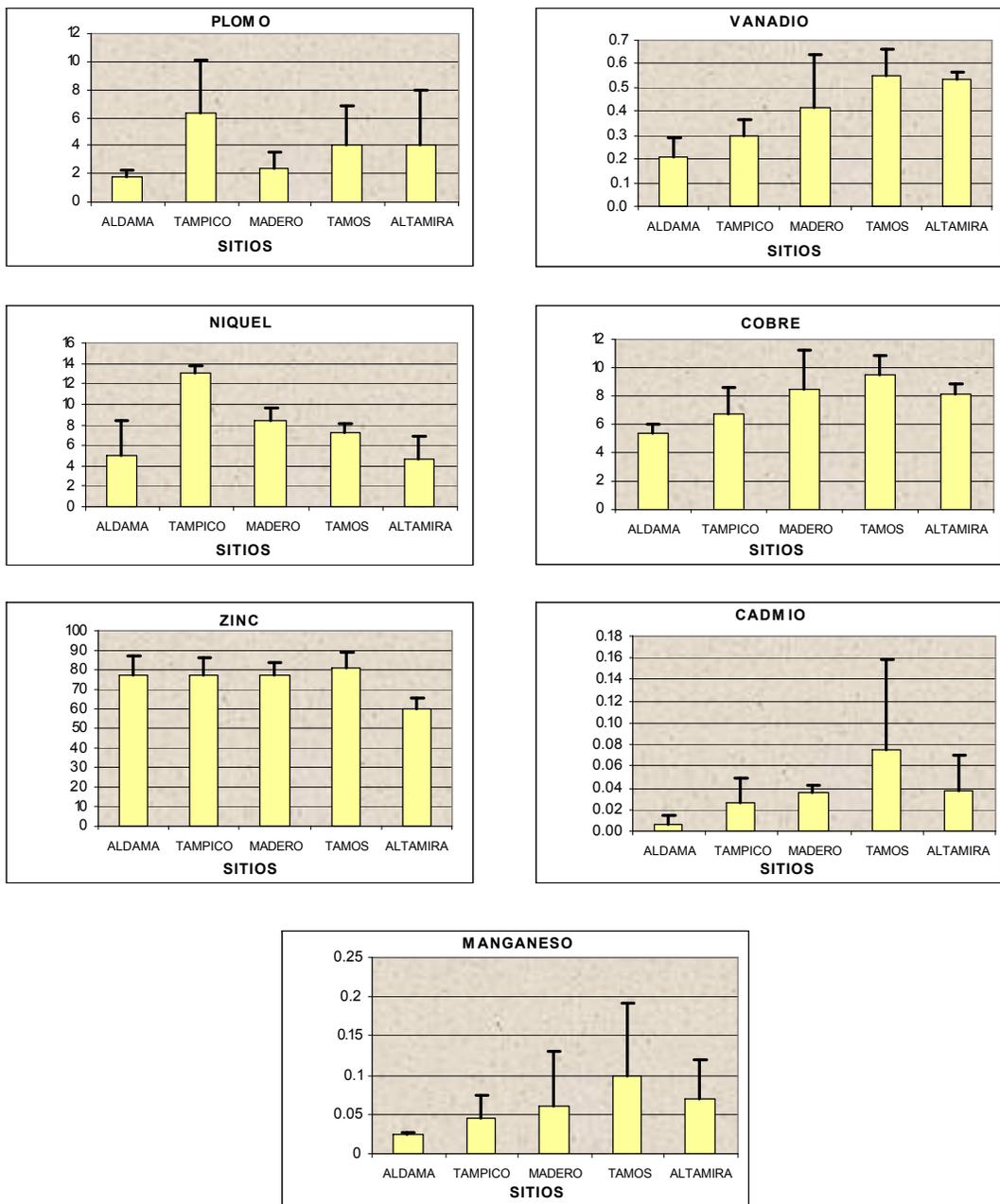


Figura. 5. Concentraciones medias ($\mu\text{g/g}$, base seca) y desviaciones estándar (barras) para los metales Pb, V, Ni, Cu, Zn, Cd (con tracto digestivo) y Mn (sin tracto digestivo) para cada sitio en tejido de *Hemidactylus frenatus*.

5.2.3 Correlación entre metales.

El Cuadro 9 muestra los coeficientes de correlación entre metales, sugiriendo las mismas fuentes de emisión para los metales significativamente correlacionados [72]. Esto se hizo para toda la zona de estudio (Aldama, Tampico, Madero, Altamira y Tamos). Las correlaciones significativas que se observaron para los datos con tracto digestivo fueron V-Cu, con una significancia de ($p \leq 0.0001$) y para los datos sin tracto digestivo, fueron Zn-Pb ($p \leq 0.0001$), Cd-Pb ($p \leq 0.005$) y Cd-Zn ($p \leq 0.018$). En todos los casos las correlaciones fueron positivas indicando que estos metales provienen de las mismas fuentes de emisión.

La relación que existe entre V-Cu podría ser fortuita, ya que en general estos metales tienen fuentes de emisión diferentes. Por ejemplo, el Cu es un metal relacionado a las actividades agrícolas, aspersores, bactericidas, fungicidas o proveniente de emisiones por incineradores [72]. El V, en cambio, es un metal que se relaciona a la industria de refinación del petróleo [74, 106]. Por otro lado, las correlaciones detectadas entre Zn, Pb y Cd pueden indicar emisiones de origen común. Es posible que dichos metales provengan de hornos de fundición o bien estén siendo emitidos por plantas generadoras de energía [33].

Cuadro 9. Correlaciones de Pearson para concentraciones de metales en tejido del *Hemidactylus frenatus* (todos los sitios combinados). Correlaciones de datos sin tracto digestivo se encuentran arriba de la diagonal, las correlaciones de datos con tracto digestivo se encuentran por debajo de la diagonal.

	Pb	V	Ni	Cu	Zn	Cd	Mn
Pb		NS	NS	NS	0.791 (0.0001)	0.678 (0.005)	NS
V	NS		NS	NS	NS	NS	NS
Ni	NS	NS		NS	NS	NS	NS
Cu	NS	0.810 (0.0001)	NS		NS	NS	NS
Zn	NS	NS	NS	NS		0.601 (0.018)	NS
Cd	NS	NS	NS	NS	NS		NS
Mn	NS	NS	NS	NS	NS	NS	

Nota: NS= No Significativo

El análisis de conglomerados permitió corroborar las correlaciones entre metales y sus afinidades en cuanto a su bio-acumulación. Para los metales V-Cu, datos con tracto digestivo, se presentan en la Figura 6; para Zn-Pb, Cd-Pb y Cd-Zn, los datos sin tracto digestivo se presentan en la Figura 7. En la Figura 6, puede advertirse que el Mn tiene una fuerte afinidad con el Cu y V aunque no significativa en las correlaciones de Pearson. Esta afinidad podría estar relacionada con las emisiones generadas en el poblado de Tamos, ya que allí se encontraron concentraciones elevadas de estos tres metales (V, Cu y Mn), y se están detectando como afines. La afinidad entre el Pb y Ni podría confirmar las altas concentraciones del municipio de Tampico que son originadas por el tráfico vehicular [15].

Para los datos sin tracto digestivo (Fig. 7), se encontraron afinidades entre Pb, Zn y Cd, es posible que dichos metales provengan de hornos de fundición o bien estén siendo generados por plantas generadoras de energía [33]. Estos metales tienen una afinidad menor con el Cu. El V, Ni y Mn, se correlacionan entre sí y presentan cierta afinidad. El Cu y V que fueron significativamente correlacionados en los datos con tracto digestivo, aparecen muy distantes en los datos sin tracto digestivo indicando su poca afinidad, esto corrobora el carácter fortuito de su correlación significativa.

En general, la presencia simultánea de metales pesados favorece la existencia de interacciones entre ellos, y las mismas fuentes de emisión [72, 97]. En nuestro estudio, las correlaciones positivas entre metales sugieren que estos metales fueron acumulados simultáneamente. Las pruebas corroboran posibles relaciones entre las concentraciones de metales detectadas en tejido y las principales fuentes de emisiones atmosféricas generadas en la zona de estudio.

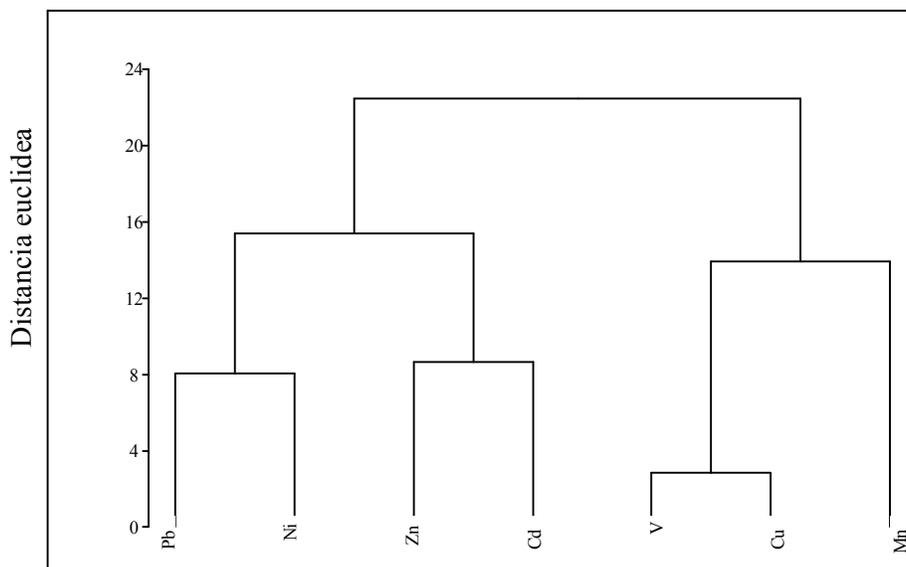


Fig 6. Dendrograma de correlación de metales en especímenes *Hemidactylus frenatus* con tracto digestivo

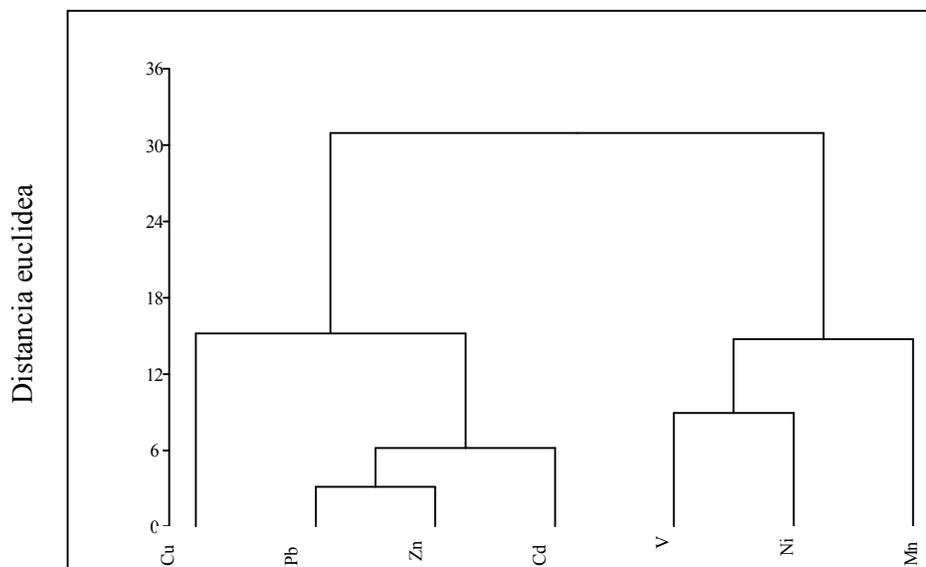


Fig 7. Dendrograma de correlación de metales en especímenes *Hemidactylus frenatus* sin tracto digestivo

5.3 Tarentola mauritanica.

5.3.1. Diferencias entre géneros.

En esta especie fue posible distinguir con facilidad el género. Se analizaron 4 hembras y 4 machos para cada sitio de estudio. No se encontraron diferencias significativas entre género, para ninguno de los 15 metales analizados en esta especie. En estudios realizados anteriormente a reptiles como cocodrilos y geckos afroamericanos (*Lacerta agilis* y *Agama stellio stellio*) tampoco se encontró diferencia significativa entre sexos [77, 79, 107, 108]. Trabajos en los que se han encontrado diferencias en concentración de metales entre género se lo atribuyen a la diferencia que existe entre su dieta alimenticia, y en algunas especies, a diferentes preferencias en su hábitat como es el caso del gecko *Anolis sagrei* [79]. Para *Tarentolla mauritanica* ambos sexos tienen la misma dieta alimenticia y preferencias en hábitat, lo que implica que tengan una exposición equivalente a los contaminantes.

5.3.2. Diferencias entre diferentes partes del cuerpo.

El análisis de metales en diferentes partes del cuerpo permite conocer dónde se acumulan los metales en mayor proporción. En el caso de los geckos, permite determinar si la cola del espécimen es útil para su uso como la parte bioindicadora del reptil, evitando así el sacrificio del gecko, ya que ésta tiene la posibilidad de regenerarse. Para esto, se analizaron concentraciones de 15 metales en cola, tracto digestivo y cuerpo sin cola y sin tracto, separadamente.

En general, la acumulación de metales analizadas en las diferentes partes del cuerpo de *Tarentola mauritanica* se presentó en el siguiente orden: tracto digestivo > cuerpo sin cola y sin tracto > cola. El tracto digestivo presentó las concentraciones más altas para Li, V, Cr, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sn, Sb, Ba y Pb. El B y el Sr se acumulan en mayor proporción en el cuerpo sin cola y sin tracto digestivo (Cuadro 12). En general, el análisis de la cola presentó la menor concentración de metales. Esta baja concentración de metales en esta parte del cuerpo puede deberse a que los geckos como mecanismo de defensa ante sus depredadores suelen desprender su cola, entonces, si los especímenes capturados para el estudio no conservan su cola original de nacimiento,

esto podría no representar el verdadero patrón de contaminación por metales al que el animal estuvo expuesto en el tiempo total de vida [97].

La diferencia en la absorción de metales indica que los metales no están siendo asimilados equitativamente en el tracto digestivo y éstos, una vez en el cuerpo, no se distribuyen de igual manera en las distintas partes del cuerpo. [102]. Estas observaciones concuerdan con trabajos previos en esta especie. Los análisis realizados en la bio-acumulación de metales en diferentes partes del cuerpo en diversos organismos muestran que metales como Pb, As, Se, Co, Cd, Cu, Ni, Zn y Cr, se presentaron en mayor concentración en el tracto digestivo que en el resto de las partes del cuerpo [40, 67, 102]. En el caso del Mn, éste se deposita en mayor proporción en el cuerpo que en la cola; y la cola, a su vez, acumula mayores concentraciones que las que se encuentran en el tracto digestivo, como sucede en renacuajos (*Rana catesbiana*) [102]. La cola no es una parte adecuada para su uso como la porción bioindicadora en geckos, ya que acumula un porcentaje muy bajo de metales, además, de que varía dependiendo si la cola es original o de segundo crecimiento.

El cuerpo presenta concentraciones de metales más elevadas con respecto a la cola. La concentración de metales en estas dos partes representa la acumulación total en el tiempo de vida del gecko. Por otro lado, el tracto digestivo representa la concentración de metales ingerida y digerida en corto plazo. De esta manera, la suma de concentraciones de metales encontradas en todas las partes del cuerpo de los geckos permite conocer la acumulación total de contaminantes en el organismo de los geckos, tanto en un periodo largo y a corto plazo. Cabe mencionar que en las partes del cuerpo analizadas por separado no se encontraron diferencias significativas entre los sitios de estudio para la mayoría de los metales (Cuadro 12). Los geckos están acumulando metales en su organismo en las diferentes partes del cuerpo, pero ninguna de estas partes por separado funcionaría para discriminar sitios en cuanto a contaminación.

5.3.3. Correlación entre partes del cuerpo con relación al contenido de metales.

Se realizaron correlaciones para detectar similitudes en la acumulación de 15 metales entre la cola y el cuerpo con tracto digestivo (ver Apéndice E). El análisis no mostró correlación significativa entre la cola y cuerpo para ningún metal. Por lo tanto, no existe un patrón semejante de acumulación de metales entre ambas partes. Esto corrobora una vez más que esta parte del cuerpo no es adecuada como la parte bioindicadora del gecko para ninguno de estos 15 metales analizados.

Se realizaron, además, correlaciones de concentraciones de metales entre cada parte del cuerpo del gecko analizada (cola, tracto digestivo, cuerpo con tracto digestivo y cuerpo sin tracto digestivo y sin cola). Ninguna correlación fue significativa, entre dos partes del cuerpo para ningún metal. Esto significa que los metales se acumulan en desigual proporción entre las diferentes partes del cuerpo en estudio.

5.3.4. Concentraciones de metales en tejido de especímenes con tracto digestivo y sin tracto digestivo.

Para el análisis de las concentraciones de metales en tejido con y sin tracto digestivo de *Tarentola mauritanica*, se utilizaron valores reconstruidos. Los datos sin tracto digestivo resultan de sumar las concentraciones de la cola y el cuerpo sin tracto digestivo. Los datos con tracto digestivo están formados por la suma de las concentraciones de metales en la cola, el tracto digestivo y cuerpo sin tracto y sin cola.

Los resultados con tracto digestivo muestran concentraciones mayores a las de los datos sin tracto digestivo para todos los metales analizados Li, B, V, Cr, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Sn, Sb, Ba y Pb. Así mismo, estos datos muestran diferencias significativas entre los sitios de estudio para la mayoría de los metales (Cuadro 10).

Los datos sin tracto digestivo (Cuadro 11) presentan concentraciones menores respecto a los datos con tracto digestivo, y solo muestran diferencias significativas entre sitios para los metales B, Cr, Sb y Ba. Las concentraciones para cada metal no presentan un patrón consistente entre el sitio seleccionado como referencia y los sitios con posible grado de contaminación. Estas diferencias en concentraciones de metales entre geckos

con y sin tracto digestivo se relacionan con el metabolismo de los geckos, anteriormente explicado en el inciso 5.2.1.

Los metales analizados en los datos con tracto digestivo en *Tarentola mauritanica* presentan un claro patrón en su concentración entre sitios, consistente con lo encontrado en *Hemidactylus frenatus*, en general, estos datos funcionan mejor que los datos sin tracto digestivo, ya que es posible identificar un patrón similar en las concentraciones con diferencias significativas entre sitios. Estudios realizados en renacuajos (*Rana catesbiana*) también presentaron las concentraciones más elevadas en el cuerpo completo que en el resto de las partes del cuerpo analizadas [102].

Con los resultados de este gecko, *Tarentola mauritanica*, y los datos obtenidos de la especie *Hemidactylus frenatus*, podemos afirmar que las concentraciones obtenidas en el cuerpo completo de geckos (cuerpo, cola y tracto digestivo) funcionan mejor en su conjunto como la parte bioindicadora. Esto elimina la necesidad de analizar por separado partes u órganos del cuerpo para identificar la presencia de contaminación por metales. Estos datos discriminan adecuadamente los sitios para la mayoría de los metales estudiados. Es posible, entonces determinar concentraciones de metales en tejido de geckos, en los que se identificó que existen diferencias significativas entre las concentraciones de geckos con y sin tracto digestivo.

Cuadro 10. Concentración de metales en tejido de *Tarentola mauritanica* (Media, \pm desviación estándar, rango y resultados del test de Duncan, presentados en ($\mu\text{g/g}$) base seca). Cuerpo completo (con tracto digestivo)

METALES	NUEVO ESTADIO	HUELVA	BONARES
Li	7.862 \pm 9.152	11.259 \pm 11.605	13.606 \pm 9.252
	1.141 - 28.375	0.977 - 31.758	1.746 - 30.375
	(A)	(A)	(A)
B	1485.275 \pm 631.084	138.698 \pm 85.459	205.817 \pm 180.611
	824.180 - 2308.136	56.573 - 168.016	31.325 - 515.070
	(A)	(B)	(B)
V	26.386 \pm 12.722	36.801 \pm 17.088	40.482 \pm 28.662
	13.573 - 44.604	71.415 - 71.415	7.588 - 79.827
	(A)	(A)	(A)
Cr	53.540 \pm 34.665	36.622 \pm 16.898	22.213 \pm 13.750
	18.709 - 112.127	68.881 - 68.881	5.901 - 40.727
	(A)	(A)	(B)

METALES	NUEVO ESTADIO	HUELVA	BONARES
Ni	198.455 ± 170.124	107.878 ± 62.605	48.388 ± 49.011
	48.590 - 553.059	38.910 - 222.188	5.622 - 156.785
	(A)	(A)	(B)
Cu	1218.360 ± 750.100	1179.959 ± 2080.492	1515.897 ± 1704.591
	460.980 - 2363.559	239.145 - 6322.501	264.771 - 4887.556
	(A)	(A)	(A)
Zn	7855.000 ± 2260.271	11050.711 ± 5496.555	7922.607 ± 3497.863
	4458.047 - 10780.767	23245.542 - 6212.362	4311.314 - 14680.548
	(A)	(A)	(A)
As	7.751 ± 3.832	38.467 ± 42.078	32.523 ± 26.530
	2.745 - 14.148	6.839 - 135.576	4.387 - 88.227
	(A)	(A)	(B)
Se	37.827 ± 19.472	42.011 ± 31.450	16.132 ± 22.336
	11.063 - 59.414	6.498 - 97.473	1.178 - 65.321
	(A)	(A)	(B)
Rb	491.716 ± 115.050	583.287 ± 136.494	657.758 ± 170.928
	276.899 - 634.486	395.446 - 733.454	365.212 - 846.224
	(A)	(A)	(A)
Sr	3958.837 ± 1874.934	6200.324 ± 1656.614	5447.452 ± 1790.213
	1124.893 - 6880.008	4114.510 - 7656.796	2579.673 - 8512.050
	(B)	(A)(B)	(A)
Sn	1304.517 ± 881.892	997.459 ± 217.227	764.503 ± 209.487
	587.482 - 3418.355	726.186 - 1342.291	517.587 - 1130.422
	(A)	(A)(B)	(B)
Sb	5.672 ± 4.103	2.370 ± 0.377	2.754 ± 1.609
	1.919 - 13.687	1.937 - 3.091	1.756 - 6.503
	(A)	(B)	(B)
Ba	1882.977 ± 1575.506	6483.496 ± 8029.003	1269.010 ± 362.587
	548.719 - 5605.393	1175.079 - 25349.418	1755.855 - 874.211
	(B)	(A)	(B)
Pb	283.978 ± 181.053	530.610 ± 403.332	469.259 ± 480.109
	102.148 - 651.429	124.255 - 1289.073	98.191 - 1283.306
	(A)	(A)	(A)

Cuadro 11. Concentración de metales en tejido de *Tarentola mauritanica* (Media, ± desviación estándar, rango y resultados del test de Duncan, presentados en (µg/g) base seca). Cuerpo con cola y sin tracto digestivo (sin tracto digestivo).

METALES	NUEVO ESTADIO	HUELVA	BONARES
Li	0.125 ± 0.193	0.163 ± 0.206	0.235 ± 0.232
	0.010 - 0.579	0.020 - 0.623	0.020 - 0.402
	(A)	(A)	(A)
B	352.152 ± 940.714	5.638 ± 3.824	3.336 ± 2.196
	12.603 - 2680.256	2.135 - 11.494	0.628 - 6.865
	(A)	(B)	(B)
V	0.256 ± 0.200	0.392 ± 0.198	0.466 ± 0.291
	0.052 - 0.629	0.084 - 0.662	0.077 - 0.739
	(A)	(A)	(A)

METALES	NUEVO ESTADIO	HUELVA	BONARES
Cr	1.543 ± 0.728	0.782 ± 0.582	0.425 ± 0.410
	0.873 - 2.644	0.059 - 1.513	0.018 - 1.014
	(A)	(B)	(B)
Ni	3.129 ± 2.163	2.870 ± 3.078	3.103 ± 5.139
	1.583 - 8.034	0.342 - 9.819	0.020 - 14.913
	(A)	(A)	(A)
Cu	3.870 ± 1.822	3.388 ± 1.460	8.746 ± 5.791
	1.688 - 6.062	1.490 - 5.858	1.755 - 15.338
	(A)	(A)	(A)
Zn	117.668 ± 38.250	152.227 ± 78.471	130.432 ± 50.352
	67.227 - 177.844	97.065 - 334.874	82.160 - 196.752
	(A)	(A)	(A)
As	0.144 ± 0.094	0.748 ± 0.565	1.330 ± 1.588
	0.020 - 0.291	0.062 - 1.586	0.012 - 4.260
	(A)	(A)	(A)
Se	0.626 ± 0.298	0.610 ± 0.548	0.291 ± 0.391
	0.262 - 1.043	0.020 - 1.562	0.020 - 1.045
	(A)	(A)	(A)
Rb	9.066 ± 2.491	10.175 ± 1.793	13.886 ± 6.877
	4.422 - 12.764	7.813 - 12.922	6.955 - 22.499
	(A)	(A)	(A)
Sr	67.709 ± 34.928	93.910 ± 30.992	95.978 ± 41.359
	19.090 - 126.732	64.782 - 161.418	33.734 - 162.038
	(A)	(A)	(A)
Sn	44.003 ± 27.040	31.661 ± 18.468	21.754 ± 12.826
	26.132 - 107.484	14.205 - 59.763	12.141 - 44.020
	(A)	(A)	(A)
Sb	0.119 ± 0.095	0.097 ± 0.102	0.051 ± 0.049
	0.020 - 0.325	0.031 - 0.338	0.155 - 0.014
	(A)	(A)(B)	(B)
Ba	24.571 ± 10.010	88.011 ± 93.884	28.106 ± 13.895
	13.301 - 36.778	29.625 - 304.286	16.195 - 50.916
	(B)	(A)	(B)
Pb	4.581 ± 1.864	10.886 ± 11.420	10.001 ± 8.333
	1.305 - 6.859	2.188 - 34.154	2.014 - 25.421
	(A)	(A)	(A)

Cuadro 12. Concentración de metales en tejido de *Tarentola mauritanica* en las distintas partes del cuerpo analizadas por separado (Media, ± desviación estándar, rango y resultados del test de Duncan, presentados en (µg/g) base seca).

a) Tracto

METALES	NUEVO ESTADIO	HUELVA	BONARES
Li	0.364 ± 0.245	0.513 ± 0.412	0.627 ± 0.589
	0.021 - 0.716	0.010 - 1.187	0.062 - 1.868
	(A)	(A)	(A)

METALES	NUEVO ESTADIO	HUELVA	BONARES
B	6.068 ± 4.018	14.204 ± 4.808	25.670 ± 19.106
	1.253 - 14.838	8.756 - 22.606	2.913 - 57.064
	(B)	(A)	(A)
V	1.330 ± 0.737	2.270 ± 1.181	2.121 ± 1.430
	0.708 - 2.425	1.077 - 4.830	0.150 - 4.366
	(A)	(A)	(A)
Cr	2.602 ± 1.161	3.912 ± 1.470	2.093 ± 1.248
	0.702 - 4.028	2.099 - 6.313	0.369 - 4.059
	(A)(B)	(A)	(B)
Ni	9.812 ± 10.094	7.445 ± 2.067	2.244 ± 2.057
	2.114 - 33.268	5.281 - 12.238	0.222 - 5.520
	(A)	(A)	(B)
Cu	135.878 ± 104.929	116.709 ± 142.858	151.545 ± 174.021
	37.227 - 300.607	27.988 - 465.645	4.803 - 494.725
	(A)	(A)	(A)
Zn	133.615 ± 30.058	174.705 ± 39.572	120.760 ± 67.990
	83.813 - 169.597	231.107 - 102.049	9.912 - 215.387
	(A)	(A)	(A)
As	0.622 ± 0.355	1.416 ± 1.227	1.395 ± 1.763
	0.266 - 1.258	0.187 - 1.999	0.064 - 5.680
	(A)	(A)	(A)
Se	0.310 ± 0.573	0.926 ± 1.104	0.485 ± 0.463
	0.010 - 1.665	0.007 - 3.395	0.037 - 1.468
	(A)	(A)	(A)
Rb	8.037 ± 2.772	11.585 ± 2.808	8.535 ± 3.853
	4.064 - 12.192	7.853 - 14.927	1.650 - 13.400
	(A)	(A)	(A)
Sr	6.930 ± 4.668	25.237 ± 42.608	35.043 ± 40.523
	2.298 - 15.197	6.318 - 130.434	0.710 - 103.057
	(A)	(A)	(A)
Sn	43.537 ± 32.508	29.836 ± 18.341	17.730 ± 6.597
	17.909 - 117.519	15.302 - 69.405	4.016 - 24.915
	(A)	(A)(B)	(B)
Sb	0.377 ± 0.421	0.203 ± 0.135	0.199 ± 0.101
	0.093 - 1.306	0.058 - 0.461	0.035 - 0.347
	(A)	(A)	(A)
Ba	100.351 ± 201.732	32.290 ± 27.434	21.342 ± 18.222
	10.551 - 597.153	7.144 - 95.875	1.453 - 51.014
	(A)	(A)	(A)
Pb	8.155 ± 10.113	5.340 ± 2.673	3.831 ± 2.433
	1.710 - 31.178	2.375 - 9.161	0.248 - 7.410
	(A)	(A)	(A)

b) Cuerpo sin cola y sin tracto

METALES	NUEVO ESTADIO	HUELVA	BONARES
Li	0.068 ± 0.106	0.078 ± 0.106	0.135 ± 0.233
	0.007 - 0.321	0.010 - 0.317	0.010 - 0.691
	(A)	(A)	(A)

METALES	NUEVO ESTADIO	HUELVA	BONARES
B	3.954 ± 2.324	5.391 ± 3.604	3.044 ± 2.077
	2.422 - 9.095	2.125 - 11.484	0.618 - 6.397
	(A)	(A)	(A)
V	0.062 ± 0.092	0.124 ± 0.124	0.144 ± 0.256
	0.010 - 0.267	0.010 - 0.237	0.010 - 0.691
	(A)	(A)	(A)
Cr	1.290 ± 0.664	0.645 ± 0.518	0.346 ± 0.373
	0.363 - 2.319	0.010 - 1.479	0.008 - 0.935
	(A)	(B)	(B)
Ni	1.910 ± 0.883	2.341 ± 2.930	2.920 ± 5.158
	1.090 - 3.334	0.145 - 8.927	0.010 - 14.693
	(A)	(A)	(A)
Cu	1.305 ± 0.986	1.418 ± 1.044	3.272 ± 4.683
	0.010 - 2.642	0.491 - 3.358	0.010 - 13.421
	(A)	(A)	(A)
Zn	40.092 ± 20.966	39.284 ± 24.001	49.700 ± 60.061
	19.396 - 77.466	14.328 - 64.401	8.266 - 159.781
	(A)	(A)	(A)
As	0.122 ± 0.080	0.426 ± 0.486	1.144 ± 1.608
	0.010 - 0.219	0.010 - 1.482	0.010 - 4.250
	(A)	(A)	(A)
Se	0.244 ± 0.273	0.200 ± 0.233	0.147 ± 0.360
	0.010 - 0.844	0.010 - 0.570	0.010 - 1.035
	(A)	(A)	(A)
Rb	4.339 ± 1.656	4.542 ± 1.983	7.463 ± 6.059
	1.965 - 6.947	1.579 - 7.044	1.091 - 15.336
	(A)	(A)	(A)
Sr	23.595 ± 16.308	26.900 ± 19.291	37.741 ± 40.073
	6.092 - 49.725	9.185 - 65.047	3.217 - 96.555
	(A)	(A)	(A)
Sn	37.126 ± 25.769	23.707 ± 20.992	15.379 ± 14.178
	17.179 - 96.710	1.927 - 54.928	4.358 - 40.294
	(A)	(A)(B)	(B)
Sb	0.104 ± 0.098	0.087 ± 0.102	0.035 ± 0.050
	0.010 - 0.315	0.021 - 0.328	0.004 - 0.145
	(A)	(A)	(A)
Ba	14.501 ± 7.195	16.949 ± 13.486	16.082 ± 16.839
	3.734 - 27.146	3.804 - 39.119	2.127 - 42.881
	(A)	(A)	(A)
Pb	2.451 ± 1.088	5.580 ± 8.731	5.139 ± 8.339
	0.856 - 4.120	0.904 - 26.104	0.278 - 24.020
	(A)	(A)	(A)

c) Cola

METALES	NUEVO ESTADIO	HUELVA	BONARES
Li	0.057 ± 0.088	0.085 ± 0.128	0.100 ± 0.115
	0.003 - 0.258	0.006 - 0.306	0.010 - 0.311
	(A)	(A)	(A)

METALES	NUEVO ESTADIO	HUELVA	BONARES
B	348.198 ± 941.246	0.246 ± 0.668	0.292 ± 0.633
	9.226 - 2677.614	0.010 - 1.899	0.010 - 1.809
	(A)	(B)	(B)
V	0.194 ± 0.121	0.268 ± 0.169	0.322 ± 0.321
	0.042 - 0.362	0.074 - 0.576	0.036 - 0.729
	(A)	(A)	(A)
Cr	0.253 ± 0.276	0.137 ± 0.189	0.079 ± 0.128
	0.010 - 0.718	0.010 - 0.532	0.010 - 0.303
	(A)	(A)	(A)
Ni	1.219 ± 1.929	0.529 ± 0.547	0.183 ± 0.282
	0.010 - 5.843	0.010 - 1.599	0.009 - 0.770
	(A)	(A)(B)	(B)
Cu	2.565 ± 1.002	1.970 ± 1.531	5.474 ± 4.883
	1.527 - 4.244	0.999 - 5.708	1.745 - 12.352
	(A)(B)	(B)	(A)
Zn	77.576 ± 26.055	112.943 ± 63.179	80.732 ± 43.555
	38.292 - 109.489	57.958 - 250.694	36.971 - 155.828
	(A)	(A)	(A)
As	0.022 ± 0.032	0.322 ± 0.459	0.186 ± 0.163
	0.006 - 0.102	0.006 - 1.373	0.002 - 0.402
	(B)	(A)	(A)(B)
Se	0.382 ± 0.250	0.410 ± 0.345	0.145 ± 0.254
	0.069 - 0.657	0.010 - 0.991	0.010 - 0.712
	(A)	(A)	(A)
Rb	4.727 ± 1.185	5.633 ± 1.628	6.423 ± 1.853
	2.457 - 6.258	3.479 - 7.326	3.202 - 8.662
	(A)	(A)	(A)
Sr	44.114 ± 20.484	67.010 ± 16.856	58.237 ± 22.527
	12.954 - 77.006	42.648 - 96.371	30.517 - 100.569
	(B)	(A)	(A)(B)
Sn	6.877 ± 3.649	7.954 ± 3.541	6.375 ± 2.642
	2.159 - 12.048	3.480 - 12.895	3.423 - 10.893
	(A)	(A)	(A)
Sb	0.015 ± 0.014	0.010 ± 0.000	0.015 ± 0.016
	0.010 - 0.049	0.010 - 0.010	0.010 - 0.054
	(A)	(A)	(A)
Ba	10.070 ± 6.082	71.062 ± 94.717	12.024 ± 5.045
	3.270 - 19.228	9.452 - 293.769	5.447 - 18.790
	(B)	(A)	(B)
Pb	2.130 ± 1.387	5.306 ± 4.098	4.862 ± 5.867
	0.448 - 2.987	0.992 - 13.507	0.581 - 14.514
	(A)	(A)	(A)

5.3.5. Diferencias entre sitios de muestreo.

Los resultados con tracto digestivo de la especie *Tarentola mauritanica* muestran diferencias significativas y las concentraciones siguen un patrón consistente entre los sitios de estudio, teniendo el sitio de referencia los valores más bajos en general.

Los especímenes analizados en la colonia Nuevo Estadio, próxima al área industrial de Huelva (< 1 km), presentan las mayores concentraciones para B, Cr, Ni, Sn y Sb, además de los segundos valores más altos para Cu, Zn, Se y Ba. Altas concentraciones de Ni y Cr podrían provenir de procesos de combustión y de la industria petroquímica cercana a esta zona [109]. Estudios realizados a la calidad del aire en el suroeste de Huelva [110] muestran que el Cu y Zn se relacionan con actividades metalúrgicas y que las emisiones de éstas provienen principalmente de las plantas industriales Atlantic Cooper, Fertilberia, Roída y Foret, ubicadas en el polígono industrial cercano a esta zona de estudio. Metales como el Sb y Ba han sido relacionados con emisiones de procesos de combustión de motores y abrasión de neumáticos, debido al tráfico vehicular que circula en la zona [109]. El B y Sn se presentan en altas concentraciones en los geckos de este sitio cerca del área industrial que podrían estar relacionados con actividades antropogénicas. Por otro lado, el Se parece provenir de actividades geogénicas más que antropogénicas, donde, partículas de Se podrían estar siendo emitidas por las excavaciones y transportadas en el polvo desde áreas cercanas dedicadas a la actividad minera [74, 83].

La ciudad de Huelva, influida por alto tráfico vehicular, presenta las concentraciones más elevadas en Zn, As, Se, Sr, Ba y Pb. La presencia de Se (mencionado anteriormente como de origen geogénico) indica que esta área en estudio está siendo afectada por las emisiones mineras cercanas a la ciudad [83]. Altas concentraciones de Pb y Ba están relacionadas con el tráfico vehicular, ya sea mediante la combustión de gasolinas o la abrasión de neumáticos [74]. Aunque el Pb ha sido retirado como aditivo en las gasolinas, los resultados muestran que aún sigue estando presente en áreas influidas por tráfico vehicular. El estudio realizado por Alastuey [110] en la calidad del aire en el suroeste de Huelva, concluye que el Zn y el As se originan de actividades metalúrgicas. Altas concentraciones de estos dos metales en el área urbana de Huelva indican que esta área está siendo alcanzada por las emisiones de las plantas

industriales Atlantic Cooper, Fertiberia, Roída y Foret, en general dedicadas a actividades metalúrgicas. La presencia de Sr se debe principalmente a una fuente de origen crustal [110].

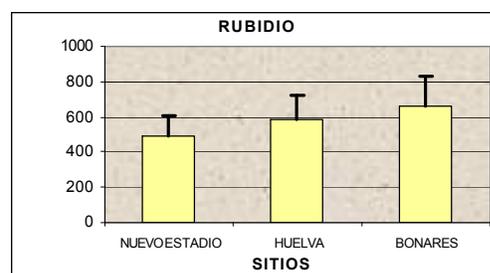
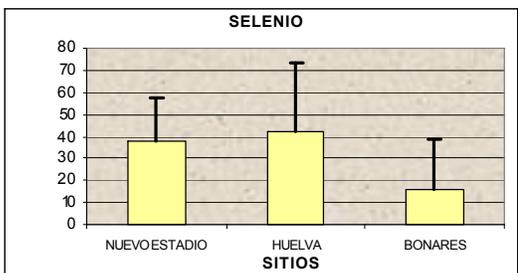
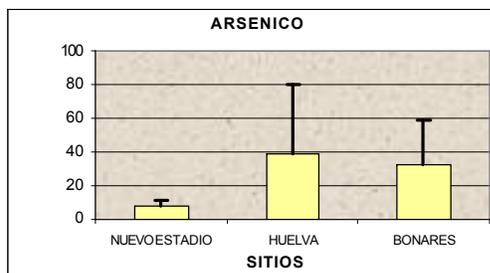
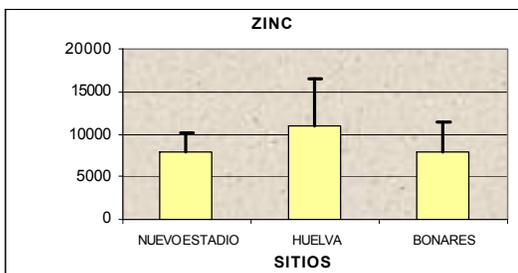
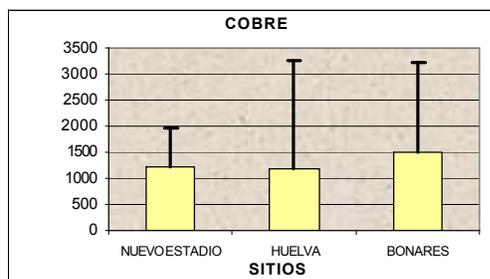
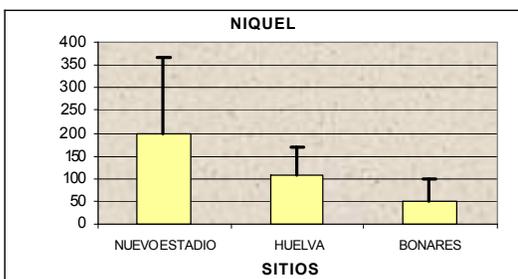
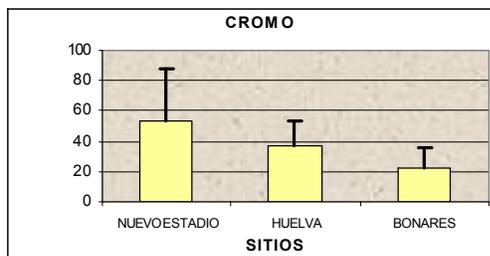
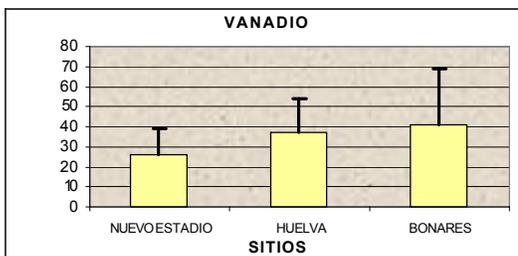
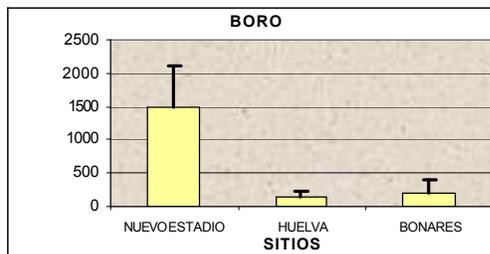
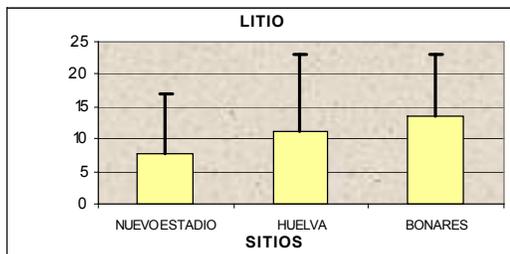
Bonares, escogido como posible sitio de referencia, presenta concentraciones de todos los metales analizados destacando Li, V, Cu, Rb como los más abundantes y las segundas concentraciones más elevadas para B, As, Sr, Sb y Pb. Con estos resultados podemos comprobar que este sitio está siendo afectado por las emisiones industriales y urbanas, que podrían estar siendo transportadas desde las fuentes de emisión por medio del viento [77]. Por esta razón, este no es un buen sitio de referencia para los metales antes mencionados como inicialmente se había propuesto. Sin embargo, Bonares presenta las concentraciones de menos magnitud en los metales Cr, Ni, Zn, Se, Sn y Ba, por lo que puede resultar una referencia adecuada para estos seis metales.

De manera general, puede observarse (Fig. 8) que las concentraciones de Li, V, Cu y Rb presentan patrones de acumulación similares en las que Bonares muestra concentraciones ligeramente más altas y Nuevo Estadio ligeramente más bajas. Para los metales como B, Cr, Ni, Sn y Sb también es posible observar patrones de acumulación similares en las concentraciones, donde, el polígono industrial (Nuevo Estadio) presenta las concentraciones más elevadas y el sitio de referencia, las de menor concentración. Por otro lado, se presentan los mismos patrones de concentración de metales para Ba, Pb, Sr, Zn y As, los cuales indican que Huelva presenta las concentraciones más altas seguido de Bonares. Para la mayoría de los metales se encontró que las concentraciones acumuladas en geckos son significativamente diferentes entre sitios, lo que indica que estos geckos (*Tarentola mauritanica*) son apropiados para utilizarlos como bioindicadores, siendo capaces de absorber contaminantes relacionados con las emisiones específicas del medio circundante.

Los tres sitios de muestreo seleccionados incluyen dos afectados por contaminantes atmosféricos provenientes de diversas fuentes, y uno más como sitio de referencia. En general, los geckos del sitio de referencia (Bonares) muestran las concentraciones más bajas para Cr, Ni, Zn, Se, Sn y Ba, indicando que es factible utilizar este sitio como referencia para estos metales. Sin embargo, al parecer este sitio

está siendo afectado por ciertas emisiones industriales y urbanas, que podrían estar siendo transportadas desde las fuentes de emisión por medio del viento [77]. La acumulación de metales en geckos de Nuevo Estadio, cercano al polígono industrial, mostró las concentraciones más altas para B, Cr, Ni, Sn y Sb de los metales analizados y las segundas más altas para Cu, Zn, Se y Ba. Los resultados demuestran que esta área es afectada por las emisiones de las empresas ubicadas en el polígono industrial. Los geckos analizados de la ciudad de Huelva presentaron las concentraciones más altas para Ba y Pb provenientes del masivo tráfico vehicular, sin embargo, esta ciudad al igual que Bonares está siendo afectada por las emisiones producidas en el polígono industrial.

Para la mayoría de los metales se encontró que las concentraciones acumuladas en geckos son significativamente diferentes entre sitios, lo que indica que estos geckos (*Tarentola mauritanica*) son apropiados para utilizarlos como bioindicadores. Son capaces de absorber contaminantes relacionados con las emisiones específicas del medio circundante.



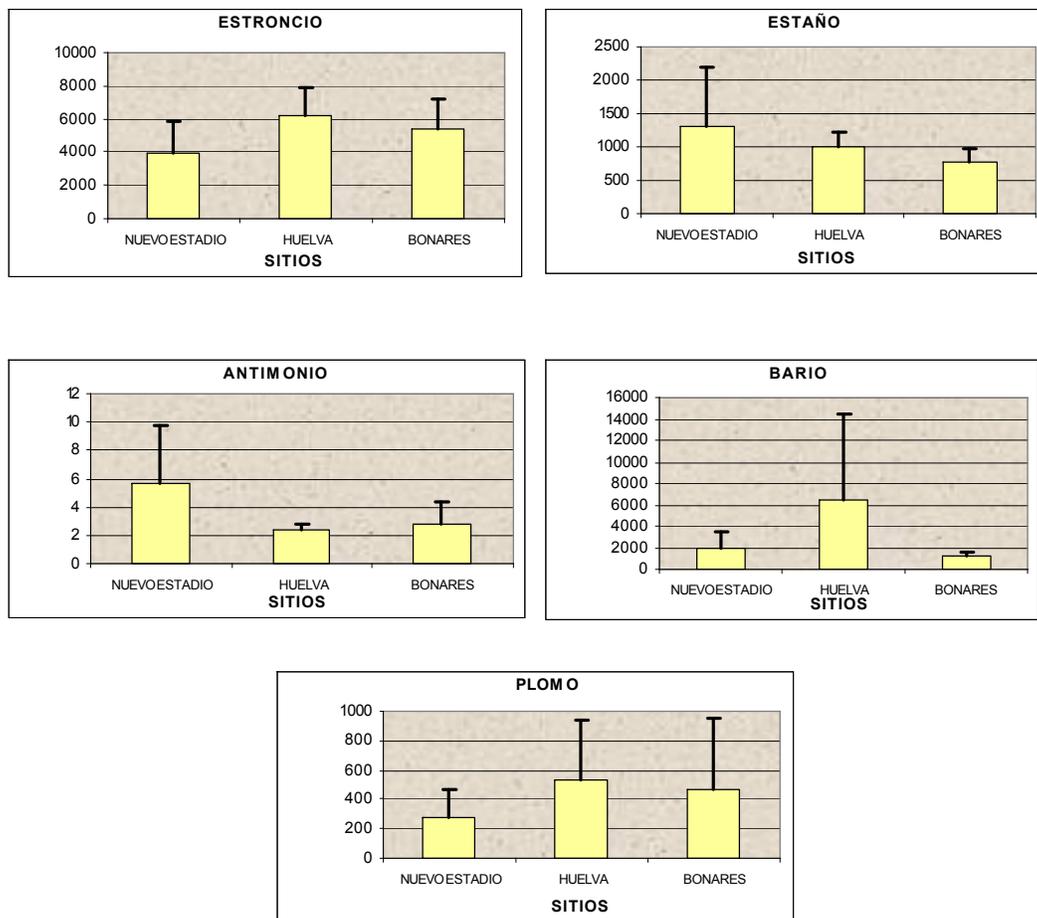


Figura. 8. Concentraciones medias (µg/g, base seca) y desviaciones estándar para los metales Li, B, V, Ni, Cr, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Sn, Sb, Ba y Pb, en especímenes (*Tarentola mauritanica*) con tracto digestivo (cuerpo completo) para cada sitio.

5.3.6. Correlaciones entre metales.

El cuadro 12 muestra los coeficientes de correlación entre metales, sugiriendo una relación entre ellos y fuentes de emisión comunes [72]. Esto se hizo para toda la zona de estudio que comprende los sitios Nuevo Estadio, Huelva y Bonares. Para los datos con tracto digestivo se observó un total de 11 pares de elementos correlacionados, de los cuales 9 tienen correlación positiva ($p \leq 0.05$) y 2 presentan correlación negativa ($p \leq 0.05$). Adicionalmente, se presentan 22 pares de elementos correlacionados en datos sin

tracto digestivo, de los cuales 13 tienen correlación positiva ($p \leq 0.05$) y 9 pares están correlacionados negativamente ($p \leq 0.05$).

En los datos sin tracto digestivo, los pares correlacionados negativamente son: Pb-Sb, Pb-Sn, Ba-Li, V-Cr, Zn-Cr, Sn-V, Zn-Sn, Sn-Sr y Cr-Li, sugiriendo que estos pares de elementos provienen de diferentes fuentes [72]. Las correlaciones positivas fueron para: Pb-Zn, Pb-Sr, Pb-V, Zn-Li, Zn-V, Zn-Sr, Sn-Cr, Sn-Sb, Sr-Li, Sr-V, V-As, As-Rb y Sb-Cr.

En los datos con tracto digestivo, el Sr es el metal que presenta mayores correlaciones positivas, específicamente con otros 5 metales como Li, V, Cr, Zn, y Pb. Las dos correlaciones negativas encontradas fueron entre Sr-Sb, Rb-Sn indicando que estos elementos vienen de diferentes fuentes [72]. Las correlaciones positivas fueron para: Zn-Li, Zn-Sr, Zn-V, V-Sr, V-Pb, Pb-Sr, Sr-Li, Cr-Sr y As-Rb. En general, estos datos muestran que los metales están siendo altamente correlacionados con las fuentes de emisión de la zona [72].

Siete pares de correlaciones positivas fueron encontradas en ambos casos (entre los datos con y sin tracto digestivo) estos pares fueron: Zn-Li, Zn-V, Rb-As, Sr-Li, Sr-V, Sr-Zn, Pb-Sr. Para algunas parejas los coeficientes de correlación son similares en los datos con y sin tracto digestivo. Estas correlaciones sugieren que los pares de metales son generados por fuentes de emisión locales (plantas industriales Atlantic Cooper, Fertiberia, Roída y Foret, así como el tráfico vehicular y de origen crustal), dando como resultado una correlación entre ellos, debido a la proximidad entre las fuentes de emisión [53, 74, 83, 109].

Un análisis de conglomerados permite corroborar las correlaciones entre metales y sus afinidades en cuanto a bio-acumulación. En la Figura 9 (datos con tracto digestivo), se aprecian claramente afinidades de metales aglomerados en 4 grupos: Cr, Sn, Ni y Sb; B, Se y Ba; Cu, As y Rb; Li, Sr, V, Zn y Pb. Estos grupos permiten corroborar las correlaciones positivas detectadas (Cuadro 13). Asimismo, se comprueba que no existe afinidad entre Sr-Sb, Rb-Sn, corroborando las correlaciones negativas encontradas en especímenes con tracto digestivo (Cuadro 13). Este análisis de conglomerados presenta

afinidades entre Zn-Pb y Cr-Sn que no fueron identificadas por la prueba de correlación de Pearson.

En el dendrograma de la Figura 10, se observan las afinidades de metales formados en 4 grupos: Cr, Sn y Sb; B, Se y Ba; Ni, As, Cu y Rb; por último, el formado por Pb, V, Zn, Sr y Li, estos grupos permiten corroborar las correlaciones positivas detectadas (Cuadro 13). También, se puede observar cómo las parejas de metales (Pb-Sb, Pb-Sn, Ba-Li, V-Cr, Zn-Cr, Sn-V, Zn-Sn, Sn-Sr y Cr-Li), aparecen separados demostrando que no existe afinidad entre ellos y confirmando las correlaciones negativas encontradas en especímenes sin tracto digestivo (Cuadro 13).

En ambos dendogramas (sin y con tracto digestivo) se presentan 2 grupos similares de metales entre B-Se-Ba y Cu-As-Rb, aunque en mayor proporción en los datos con tracto digestivo. Esto sugiere una afinidad de fuentes mixtas relacionadas con las actividades metalúrgicas y de producción de fosfatos. Esta asociación entre elementos emitidos por diferentes fuentes se debe a la proximidad de las plantas industriales (Atlantic cooper) y de producción de fosfatos (Fertiberia, Roída y Foret) [53].

En general, la presencia simultánea de metales pesados favorece la existencia de interacciones entre ellos, y las mismas fuentes de emisión [97, 72]. En nuestro estudio las correlaciones positivas entre metales sugieren que estos metales fueron acumulados simultáneamente evidenciando posibles relaciones entre las concentraciones de metales detectadas en tejido y las principales fuentes de emisiones atmosféricas generadas en la zona de estudio.

Cuadro 13. Correlación Pearson entre concentración de metales en tejido de *Tarentola mauritanica* (todos los sitios combinados).
Correlaciones de datos sin tracto digestivo se encuentran arriba de la diagonal, las correlaciones de datos con tracto digestivo se encuentran por debajo de la diagonal.

	Li	B	V	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Se	Rb	Sr	Sn	Sb	Ba	Pb
Li		NS	NS	-0.477 (0.018)	NS	NS	0.407 (0.049)	NS	NS	NS	0.534 (0.007)	NS	NS	-0.493 (0.014)	NS
B	NS		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
V	NS	NS		-0.445 (0.029)	NS	NS	0.570 (0.004)	0.432 (0.035)	NS	NS	0.526 (0.008)	-0.528 (0.008)	NS	NS	0.643 (0.001)
Cr	NS	NS	NS		NS	NS	-0.425 (0.039)	NS	NS	NS	NS	0.529 (0.008)	0.328 (0.025)	NS	NS
Ni	NS	NS	NS	NS		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Cu	NS	NS	NS	NS	NS		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Zn	0.412 (0.046)	NS	0.495 (0.014)	NS	NS	NS		NS	NS	NS	0.698 (0.0001)	-0.805 (0.0001)	NS	NS	0.745 (0.0001)
As	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS		NS	0.442 (0.030)	NS	NS	NS	NS	NS
Se	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS		NS	NS	NS	NS	NS	NS
Rb	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0.550 (0.005)	NS		NS	NS	NS	NS	NS
Sr	0.583 (0.003)	NS	0.435 (0.033)	NS	NS	NS	0.655 (0.001)	NS	NS	NS		-0.456 (0.008)	NS	NS	0.583 (0.003)
Sn	NS	NS	NS	0.585 (0.003)	NS	NS	NS	NS	NS	-0.452 (0.027)	NS		0.416 (0.043)	NS	-0.473 (0.019)
Sb	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-0.428 (0.037)	NS		NS	-0.410 (0.047)
Ba	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS		NS
Pb	NS	NS	0.423 (0.040)	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0.443 (0.030)	NS	NS	NS	

Nota: NS= No significativo.

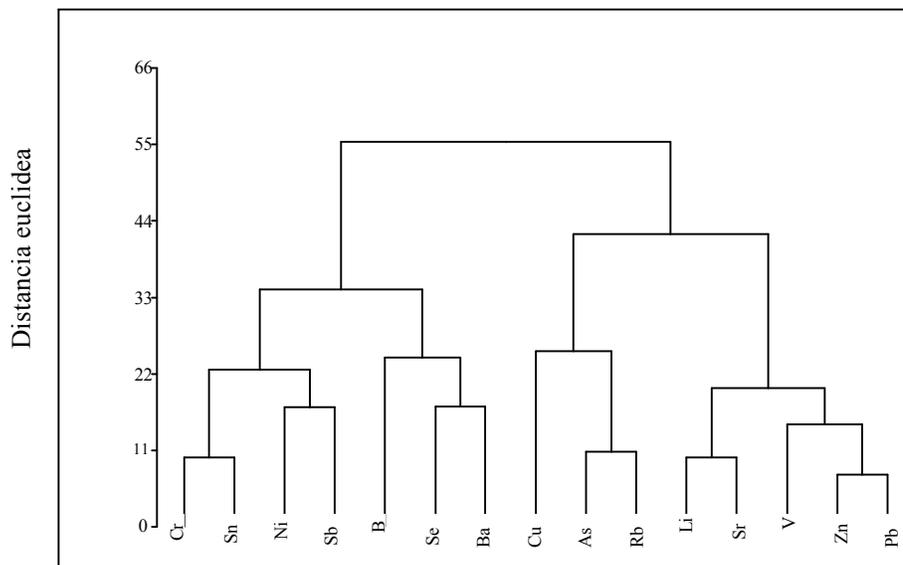


Fig. 9. Dendrograma de correlación de metales en especímenes *Tarentola mauritanica* con tracto digestivo.

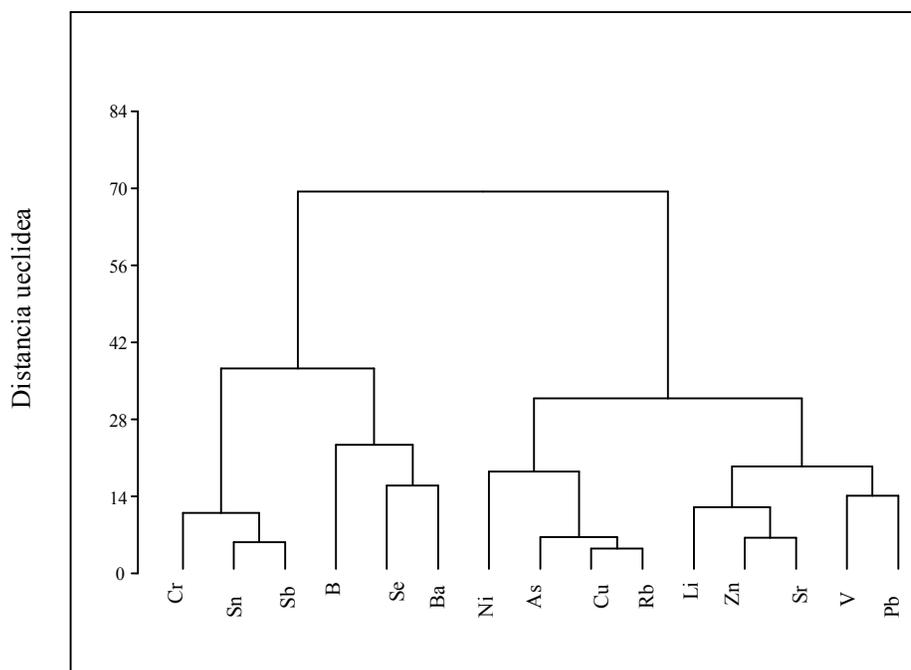


Fig. 10. Dendrograma de correlación de metales en especímenes *Tarentola mauritanica* sin tracto digestivo.

5.4. Comparación de niveles de metales entre ambas especies (*Tarentola mauritanica* y *Hemidactylus frenatus*).

Para ambas especies de geckos se encontró que el cuerpo completo (cola, cuerpo y tracto digestivo) funciona adecuadamente como la parte bioindicadora. Las concentraciones en el cuerpo completo presentan una afinidad con las fuentes de emisión específicas de las zonas de estudio. Además, la mayoría de los metales analizados mostraron diferencias significativas entre sitios, discriminándolos adecuadamente.

Los metales analizados en común para ambas especies de geckos fueron Pb, V, Ni y Zn. En general, el gecko *Tarentola mauritanica* presentó las concentraciones más altas para estos metales siendo respectivamente 430, 30, 120 y 800 veces mayores que en el gecko *Hemidactylus frenatus*. Esto no es sorprendente, ya que la especie *Tarentola mauritanica* suele ser más grande aproximadamente 2 veces y viven en promedio 2 años más que la especie *Hemidactylus frenatus*. Estas características hacen al *Tarentola mauritanica* susceptible a una mayor acumulación de contaminantes, ya que está expuesto a los contaminantes por más tiempo. Otra razón, puede ser el que la especie *Tarentola mauritanica* absorbe los metales más rápidamente, y una vez absorbidos acumula mayores concentraciones en su organismo en comparación con el *Hemidactylus frenatus*. También, es posible que las emisiones de contaminantes producidas en las zonas de estudio en España sean mayores a las generadas en los sitios de estudio en México [85, 102].

5.5. Comparación de *Hemidactylus frenatus* y *Tarentola mauritanica* con otros geckos.

En este apartado se comparan los resultados de las dos especies de geckos, con los de otros geckos estudiados para el mismo fin (bioindicadores). Pocos estudios realizados en Norte y Sur América, Asia y Europa muestran que otras especies de geckos son apropiadas como indicadoras de contaminación por metales. Por ejemplo el gecko de pared común *Hemidactylus scabriceps* para la determinación de Pb depositado en suelo en sitios rurales y urbanos, en áreas de Punjab, India, encontrando altos niveles de Pb cercano a áreas con alto tráfico vehicular, respecto a los geckos analizados en

áreas urbanas. Los niveles de plomo encontrados en este gecko (*Hemidactylus scabriceps*) fueron 2 veces mayores a los encontrados en *Hemidactylus frenatus* de nuestro estudio para los sitios influidos por el tráfico vehicular. Esto podría deberse a la alta densidad de población en la India lo cual a su vez genera un mayor número de vehículos. Así mismo, el año de estudio es un factor importante ya que, en 1988, el Pb se encontraba en mayor proporción en las gasolinas, en comparación con los últimos años, en los que se ha reducido la presencia de Pb [80]. Avery y colaboradores [111] determinaron concentraciones de Cd, Cu, Pb, y Zn en cuerpo completo, fémurs, hígado, riñones y pulmones en lagartija *Lacerta vivipara* colectadas en Inglaterra, en áreas cercanas a una mina de Pb abandonada, así como la contaminación por metales proveniente de su alimento. Las concentraciones encontradas en este reptil fueron casi 3 veces mayores a las encontradas en nuestro estudio para *Hemidactylus frenatus* y menores a las encontradas en *Tarentola mauritanica*. Schmidt [107] analizó en cuerpo completo (excepto contenido estomacal) niveles de Cd, Pb y Zn en geckos domésticos ameroafricanos (*Hemidactylus mabouia*) en 9 sitios en Porto Alegre, Brasil, donde las concentraciones de Pb fueron relacionadas al influjo del tráfico vehicular.

La especie de gecko *Agama stellio stellio* se utilizó para determinar 14 metales en tejido (menos hígado y tracto digestivo) comparados en un área urbana y de agricultura en el norte de Grecia. Las concentraciones fueron altas en geckos de altitudes bajas (áreas de agricultura) comparada con altitudes altas (área urbana). Es posible que un alto porcentaje de contaminantes se acumule en altitudes bajas debido al transporte de metales en material particulado con la dirección de los vientos. Otra explicación podría ser el uso de insecticidas y fertilizantes con alto contenido de metales. El tipo de vida de este gecko (*Agama stellio stellio*) es completamente a nivel del suelo [101]. El gecko *Anolis sagrei* en el sur de Florida, USA, se utilizó para determinar metales pesados Pb, As, Cd, Cr, Se y Hg, encontrando concentraciones altas de Pb cercanas a áreas con alto tráfico vehicular. Así mismo, Pb fue alto en geckos colectados en áreas de explotación minera. Las concentraciones de Pb encontradas para la especie *Tarentola mauritanica* en nuestro estudio fueron similares a las de *Anolis sagrei*. Para el resto de los metales analizados en esta especie, nuestros geckos estudiados (*Tarentola mauritanica* y *Hemidactylus frenatus*) presentan concentraciones muy por debajo a los obtenidos en *Anolis sagrei* [79].

Márquez-Ferrando [97] analizó concentraciones de diversos metales en la especie *Psammodromus Algirus*, en el sureste de España encontrando que los geckos de sitios contaminados cercanos al río Guadiamar contaminado por un derrame de desechos tóxicos de origen mineral. Los geckos de las zonas de estudio cercanas a este río tienen concentraciones significativamente más altas que las de los sitios de referencia, sugiriendo que estos geckos son ideales como indicadores locales de contaminación por metales en el suelo. Las concentraciones de metales reportadas en esta especie son similares a las encontradas en nuestro estudio para *Hemidactylus frenatus* y muy por debajo respecto a las concentraciones de *Tarentola mauritanica*. Un estudio realizado en geckos *Podarcis carbonelli* a los que se determinó la concentración de Cd en hígado, riñones y tracto digestivo, encontraron que la mayor concentración de Cd se presenta en el tracto digestivo. En este estudio, para *Hemidactylus frenatus* ocurre de manera similar, los datos con tracto digestivo presentan mayores concentraciones de Cd. El estudio realizado en la especie (*Podarcis carbonelli*) se realizó completamente en laboratorio, administrándoles dosis de Cd a los geckos mediante el alimento [40].

Estudios previos en *Tarentola mauritanica* realizados por Fletcher [83] muestran una alta fidelidad y relatividad con sitios contaminados, que hacen esta especie ideal para el monitoreo de contaminantes en el sureste de España cercanas al río Guadiamar. La acumulación de contaminantes en esta especie muestran una transferencia de contaminantes de origen mineral a través del alimento. Los metales analizados en este estudio fueron Al, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Mo, Cd, Sb, Cs, Ba, Pb, Tl. Las concentraciones se presentan en menor magnitud que los reportados en nuestro estudio, probablemente debido a las diferencias en las áreas de estudio. Los geckos estudiados por Fletcher se capturaron en pueblos cercanos al río Guadiamar, en el que los principales contaminantes están relacionados con el derrame de desechos tóxicos de origen minero hacia este río. Por comparación, los contaminantes analizados en este trabajo están relacionados con actividades antropogénicas (tráfico vehicular y actividades industriales) generadas cotidianamente.

Los niveles de concentración de metales en diferentes especies de geckos pueden variar entre cada especie, ya sea por su tamaño, su tiempo de vida, su dieta y sus preferencias de hábitat. Otro factor que influye en las diferencias de concentración de metales, son las fuentes de emisión de contaminantes en cada sitio de estudio [79].

CONCLUSIONES

Mediante los geckos estudiados en México (*Hemidactylus frenatus*) y España (*Tarentola mauritanica*) durante el 2007 y 2008, respectivamente, en este trabajo se demostró que estas especies, están acumulando metales emitidos a la atmósfera por diversas fuentes de actividades humanas y/o industriales, que pueden transportarse principalmente por aire y lluvia. Los hábitos y comportamiento de ambos geckos (*Tarentola mauritanica* y *Hemidactylus frenatus*) los hace susceptibles a la acumulación progresiva de metales y otros contaminantes depositados en la superficie de edificaciones donde habitan.

Los resultados de este estudio demuestran que la especie *Hemidactylus frenatus* es ideal como bioindicador ya que es abundante, manipulable en campo y laboratorio, tiene un comportamiento que puede ser monitoreado en una área geográfica de distribución que abarca zonas cálidas y que solo está delimitada por los trópicos. Además, acumulan metales en tejido tales como Cu, Zn, Cd, V, Ni y Pb en especímenes con tracto digestivo y Mn en especímenes sin tracto digestivo, provenientes de fuentes de emisión específicas. En general, la especie resulta ser un adecuado bioindicador de metales en material particulado del aire, distinguiendo fuentes de origen industrial y de tráfico vehicular. Así mismo por medio de esta especie se demostró que el sitio seleccionado como referencia fue el adecuado, ya que presenta las concentraciones significativamente más bajas para la mayoría de los metales.

La especie *Tarentola mauritanica* demostró ser también un adecuado bioindicador, debido a su abundancia y de movilidad reducida, acumulan una gran cantidad de metales en su organismo, emitidos por zonas industriales y urbanas, tales como Li, B, V, Cr, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Sn, Sb, Ba y Pb. Estos metales fueron detectables en todas las partes del cuerpo analizadas como cola, tracto y cuerpo sin cola y sin tracto. Los datos reconstruidos de especímenes con tracto digestivo (cuerpo completo) mostraron ser la parte indicadora adecuada para el monitoreo de contaminantes, reflejando éstos un patrón más claro y preciso entre los sitios contaminados y el sitio de referencia. También, fue posible demostrar que no existe diferencia significativa en la acumulación de metales entre género, ya que ambos (hembras y machos) tienen la misma dieta alimenticia y preferencias de hábitat, lo que

implica que tienen una exposición equivalente a los contaminantes. *Tarentola mauritanica* demostró ser un adecuado bioindicador de metales de origen atmosférico, identificando diversas fuentes de emisión de origen crustal, geogénico, industrial y de tráfico vehicular, todas ellas relacionadas con fuentes de emisión específicas en cada sitio de estudio. El sitio utilizado como referencia presentó concentraciones elevadas de algunos metales (Li, V, Cu, Rb, B, As, Sr, Sb y Pb), por lo que no es apropiado utilizarlo como referencia.

Los análisis realizados en las diferentes partes del cuerpo de los geckos *Tarentola mauritanica* y *Hemidactylus frenatus* demuestran que las concentraciones obtenidas en el cuerpo completo (cuerpo, cola y tracto digestivo) funcionan mejor como la parte bioindicadora. Esto elimina la necesidad de analizar por separado partes u órganos del cuerpo. Además, exhiben un claro patrón en la acumulación de metales emitidos a la atmósfera por diversas fuentes específicas en cada sitio de estudio y presentan diferencias importantes entre sitios para la mayoría de los metales analizados.

Ambas especies de geckos tienen una amplia distribución geográfica, son especies invasoras en gran parte de su distribución actual, son abundantes, sedentarios y de escasa movilidad. Son representativos del área de muestreo, fácilmente recolectables y manipulables en campo y laboratorio; además, están acumulando metales en su organismo relacionados con las fuentes de emisión específicas del medio circundante. Por lo tanto, *Tarentola mauritanica* puede utilizarse como bioindicador de contaminación por metales en material particulado del aire en el sur de las penínsulas Ibérica e Itálica, Menoría, Creta, norte de África y otras regiones de la costa del Mediterráneo. Por su lado, *Hemidactylus frenatus*, es un excelente bioindicador para las regiones cálidas de la franja tropical de América y Asia.

Las perspectivas más importantes a considerar en esta línea de investigación son desarrollar y estandarizar una metodología de monitoreo extensivo, así como desarrollar programas para el monitoreo de contaminantes de origen atmosférico, será así posible extender los estudios a diversas zonas geográficas con la intención de su uso rutinario por dependencias gubernamentales de ámbito ambiental y sanitario, principalmente en países con pocos recursos financieros.

BIBLIOGRAFÍA

1. Adamson, I.Y.R., Vincent, R., and Bakowska, J., 2003. Differential production of metalloproteinases after installing various urban air particle to rat lung. *Experimental Lung Research*. 29, 375-388.
2. Adamson, I.Y.R., Prieditis, H., and Vincent, R., 2004. Soluble and insoluble air particle fractions induce differential production of tumor necrosis factor α in rat lung. *Experimental Lung Research*. 30, 355-368.
3. Prieditis, H., and Adamson, Y. R. 2002. Comparative pulmonary toxicity of various soluble metals found in urban particulate dusts. *Experimental Lung Research*. 28, 563-576.
4. Adamson, I.Y.R., Prieditis, H., and Vincent, R., 1999. Pulmonary Toxicity of an Atmospheric Particulate Sample is due to the soluble fraction. *Toxicol Applied Pharmacol*. 157, 43-50.
5. Mugica, V. and Ortíz, E. 2005. Elemental composition of airborne particles. Analytical techniques and application in decision-making for air quality management. *Applied Analytical Chemistry in Environment*. 219-260.
6. Borrego, C., Tchepel, O., Costa, A.M., Martins, H., Ferreira, J., Miranda, A.I., 2006. Traffic-related particulate air pollution exposure in urban areas. *Atmospheric Environment*. 40, 7205–7214.
7. Deutsch, F., Mensink, C., Vankerkom, J., Janssen, L. 2008. Application and validation of a comprehensive model for PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations in Belgium and Europe, *Applied Mathematical Modelling*. 32, 1501–1510.
8. Grivas, G., Chaloulakou, A., Kassomenos, P., 2008. An overview of the PM₁₀ pollution problem, in the Metropolitan Area of Athens, Greece. Assessment of controlling factors and potential impact of long range transport. *Science of the Total Environment*. 389 , 165 – 177.
9. Lira, T. S., Barrozo, M. A. S., Assis, A. J. 2007. Air quality prediction in Uberlândia, Brazil, using linear models and neural networks. 17th European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE17.
10. Seung-Muk, Y., Totten, L. A., Sathyapriya, T., Shu, Y., Offenber, J. H., Eisenreich, S. J., Graney, J., Holsen, T. M. 2006. Atmospheric dry deposition

- of trace elements measured around the urban and industrially impacted NY–NJ harbor. *Atmospheric Environment*. 40, 6626–6637.
11. Shuxiao, W., Yu Z., Gangcai, C., Fei, W., Kristin, A., Jiming, H. 2008. Assessment of population exposure to particulate matter pollution in Chongqing, China. *Environmental Pollution*. 153, 247-256.
 12. Chow, J.C., Watson, J.G., Edgerton, S.A., and Vega, E., 2002. Chemical composition of PM_{2.5} and PM₁₀ in Mexico City during winter 1997. *Science of the Total Environment*. 287, 177-201.
 13. Meza-Figueroa, D., De la O-Villanueva, M., De la Parra, M. L. 2007. Heavy metal distribution in dust from elementary schools in Hermosilo, Sonora, México. *Atmospheric Environment*. 41, 276-288.
 14. Miranda, J., Barrera, V. A., Espinosa, A. A., Galindo, O. S., and Meinguer, J. 2005. PIXE analysis of atmospheric aerosols in Mexico City. *X-Ray Spectrometry*. 34, 315-319.
 15. Mugica, V., Maubert, M., Torres, M., Muñoz, J., and Rico, E. 2002. Temporal and Spatial Variation of metal content in TSP and PM₁₀ in Mexico city during 1996-1998, *Journal of Aerosol Science*. 33, 91-102.
 16. Querol, X., Alastuey, A., De la Rosa, J., Sánchez de la Campa, A., Plana, F., Ruiz, C. R., 2002. Source apportionment analysis of atmospheric particulates in an industrialised urban site in southwestern Spain. *Atmospheric Environment*. 36, 3113–3125.
 17. Vega, E., Reyes, E., Ruiz, H., García, J., Sánchez, G., Chow, J., and Watson, J.G. 2004. Analysis of PM_{2.5} and PM₁₀ in the atmosphere of México City during 2000-2002. *Air and Waste Management Association*. 54, 786-798.
 18. Rodríguez-Espinosa, P.F., Flores Rangel, R. M. y Hernández-Hernández, A. 2004. “Determinación de Metales Pesados en Material Particulado del Aire en la Ciudad de Tampico, Tamaulipas”, Informe Final, Informe IPN-CICATA-UA/GIADS/F01-PFRE, 17.
 19. Querol, X., Alastuey, A., López-Solera, Á., Plana, F., Mesas, A., Ortiz, L., Alzaga, R., Bayona, J. M., De la Rosa, J. 1999. Physico-chemical characterisation of atmospheric aerosols in a rural area affected by the aznalcollar toxic spill, south-west Spain during the soil reclamation activities. *The Science of the Total Environment*. 242, 89-104.

20. Querol, X., Alastuey, A., Rodríguez, S., Viana, M.M., Artiñanob, B., Salvador, P., Mantilla, E., García do Santos, S., Fernández Patierd, R., De La Rosa, J., Sánchez de la Campa, A., Menéndez, M. F., Gil, J.J., 2004. Levels of particulate matter in rural, urban and industrial sites in Spain. *Science of the Total Environment*. 334, 359–376.
21. Querol, X., Viana, M., Alastuey, A., Amato, F., Moreno, T., Castillo, S., Pey J., De la Rosa, J., Sánchez de la Campa, A., Artíñano, B., Salvador, P., García Dos Santos, S., Fernández-Patier, R., Moreno-Grau, S., Negral, L., Minguillona, M.C., Monfort, E., Gil, J.I., Inza, A., Ortega, L. A., Santamaría, J. M., Zabalza, J. 2007. Source origin of trace elements in PM from regional background, urban and industrial sites of Spain. *Atmospheric Environment*. 41, 7219–7231.
22. Querol, X., Alastuey, A., Moreno, T., Viana, M.M., Castillo, S., Pey, J., Rodríguez, S., Artiñano, B., Salvador, P., Sánchez, M., García Dos Santos, S., Herce Garraleta, M.D., Fernández-Patier, R., Moreno-Grau, S., Negral, L., Minguillóna, M.C., Monfort, E., Sanz, M.J., Palomo Marín, R., Pinilla-Gil, E., Cuevas, E., De la Rosa, J., Sánchez de la Campa, A., 2007. Spatial and temporal variations in airborne particulate matter (PM10 and PM2.5) across Spain 1999–2005. *Atmospheric Environment*, doi:10.1016/j.atmosenv.2006.10.071
23. Sánchez de la Campa, A., De la Rosa, J., Querol, X., Alastuey, A., Mantilla, E. 2007. Geochemistry and origin of PM10 in the Huelva region, Southwestern Spain. *Environmental Research*. 103, 305–316.
24. Sánchez-Rodas, D., Sánchez de la Campa, A., De la Rosa, J. D., Oliveira, V., Gómez-Ariza, J. L., Querol, X., Alastuey, A. 2007. Arsenic speciation of atmospheric particulate matter (PM10) in an industrialised urban site in southwestern Spain. *Chemosphere*. 66, 1485–1493.
25. Martínez, A. P. y Romieu, I. 1997. Introducción al monitoreo atmosférico. ECO/OPS, Metepec, Estado de México. *Atmósfera*. 93, 203.
26. Conti, M. E. and Cecchetti, G., 2001. Biological monitoring: Lichens as bioindicators of air pollution assessment – a review. *Environmental Pollution*. 114, 471-492.
27. Beyene, A., Taffere, A., Demeke, R., Works, L., Kloos, H., Ludwig, T., 2008. Comparative study of diatoms and macro invertebrates as indicators of severe water pollution: Case study of the Kebena and Akaki rivers in Addis Ababa, Ethiopia. *Ecological Indicators*. 9, 381-392.

28. Lavelle, P., Decaëns, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F., Margerie, P., Mora, P., Rossi, J. P., 2006. Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology*. 42, S3-S15.
29. Moacir Torres, A., Barros Marcelo, P., Campos Sara, C. G., Pinto H., Rajamani S., Sayre Richard, T., Colepicolo, P., 2008. Biochemical biomarkers in algae and marine pollution: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 71, 1-5.
30. Sochova, I., Hofman, J., Holoubek, I. 2006. Using nematodes in soil ecotoxicology. *Environment International*. 32, 374-383.
31. Gombert, S., Asta, J., Seaward, M. R. D. 2006. Lichens and tobacco plants as complementary biomonitors of air pollution in the Grenoble area (Isère, southeast France). *Ecological Indicators*. 6, 429-443.
32. Poikolainen, J., Kubin, E., Piispanen, J., Karhu, J., 2004. Atmospheric heavy metal deposition in Finland during 1985-2000 using mosses as bioindicators. *The Science of the Total Environment*. 318, 171-185.
33. Schintu, M., Cogoni, A., Durante, L., Cantaluppi, C., Contu, A. 2005. Moss (*Bryum radiculosum*) as a bioindicator of trace metal deposition around an industrialised area in Sardinia (Italy). *Chemosphere*. 60, 610-618.
34. Cobb George, P., Word, P. D., O'Quinn, M., 2002. Polychlorinated biphenyls in eggs and chorioallantoic membranes of American alligators (*Alligator mississippiensis*) from coastal South Carolina. *Environmental Pollution*. 118, 1-4.
35. Cobb, G. P., Word, P. D., 1997. PCB concentrations in eggs and chorioallantoic membranes of loggerhead sea turtles (*Caretta caretta*) from the Cape Romain Wildlife Refuge. *Chemosphere*. 34, 539-549.
36. De Solla-Bishop, S. R., Brooks, C. A., Van der Kraak, R. J., 1998. Organochlorine contamination, sex hormones and sexual morphology of common snapping turtles (*Chelydra serpentina serpentina*). *Environmental Health Perspectives*. 105, 1-7.
37. Burger, J. and Snodgrass, J., 2001. Metal levels in Southern leopard frogs from the Savannah River site: location and body compartment effects. *Environmental Research Section A*. 86, 157-166.
38. Burger, J. 1992. Trace element levels in pine snake hatchlings: tissue and temporal differences. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 22, 209-215.

39. Burguer, J., Campbell, R. K., Murray, S., Campbell, T. S., Gaines, K. F., Jeitner, C., Shukla, T., Burke, S., Gochfeld, M., 2007. Metal levels in blood, muscle and liver of water snakes (*Nerodia* spp.) from New Jersey, Tennessee and South Carolina. *Science of the Total Environment*. 373, 556-563.
40. Reiner, M. M., Sánchez-Hernandez, J. C., Serra, E. A., Soares, A. M. V. M. 2007. Bioaccumulation of Cd by a European Lacertid Lizard after chronic exposure to Cd-contaminated food. *Chemosphere*. 68, 1525-1534.
41. Acevedo-Figueroa, D., Rodríguez-Sierra, C. J. and Jiménez-Vélez, B. D., 2006. Concentrations of Ni and V, other heavy metals, arsenic, elemental and organic carbon in atmospheric fine particles (PM_{2.5}) from Puerto Rico. *Toxicology and Industrial Health*. 22, 87-99.
42. Dockery, D., Pope, A. 1996. Epidemiology of acute health effects: Summary of time-series studies. In: Wilson R., Spengler J. D., Editorial: Particles in our air: concentration and health effects. Cambridge, MA, USA, *Harvard University Press*. 123-147.
43. Schwartz, J. and Neas, L. M. 2000. Fine particles are more strongly associated than coarse particles with acute respiratory effects in schoolchildren. *Epidemiology*. 11, 6-10.
44. USEPA, 1999a: Method IO-2.1. Compendium of methods for Inorganic Air Pollutants, Office of Research and Development, United States Environmental Protection Agency, OHIO.
45. Raga, G.B., Baumgardner D., Castro, T., Martínez, A. A. and Navarro, G. R. 2001. Mexico City air quality: a qualitative review of gas and aerosol measurements (1960-2000). *Atmospheric Environment*. 35, 4041-4058.
46. Sepúlveda, J. D. 2003. Caracterización morfológica y química elemental de partículas PM_{2.5} en los municipios del Edo. De México: Ecatepec, Tlalnepantla y Nezahualcóyotl, y de las delegaciones Cuauhtémoc y Benito Juárez del distrito federal, mediante microscopía electrónica y microanálisis elemental por espectrometría de rayos X. Informe Final. SEMARNAT-INE-CENICA, México.
47. Umbría, A., Galán, M., Muñoz, M. J. and Martín, R. 2004. characterization of atmospheric particles: analysis of particles in the Campo de Gibraltar. *Atmósfera*. 191-206.
48. Correa, G. A., 2004: Contaminantes atmosféricos en la zona metropolitana de la Ciudad de México. Instituto Politécnico Nacional. 280pp.

49. Kumar, S. A., Rai, J., and Niwas, S., 2000: Variation of aerosols in relation to some meteorological parameters during different weather conditions. *Chemosphere*. 13, 177-184.
50. Wai, K. M., and Tanner, P. A. 2005. Extreme particulate levels at a Western Pacific Coastal City: The influence of meteorological factors and the contribution of Long-Range Transport. *Journal Atmospheric Chemistry*. 50, 103-120.
51. SEMARNAT, 2006. Inventario Nacional de Emisiones de México, 1999. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México
52. Bolívar, J. P. 1995. Aplicaciones de las espectrometrías gamma y alfa al estudio del impacto radiactivo producido por industrias no nucleares. PhD Thesis, University of Sevilla, 291 pp.
53. Conserjería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía y Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2007. Contaminación por material particulado atmosférico en el entorno de la ría de Huelva. Editorial Tf Artes Graficas. 7,45,47.
54. Weitzenfeld, H. and Romieu, I. 1990. Resultados de la encuesta sobre la situación de la contaminación del aire en América Latina y El Caribe. Metepec: *ECO*.
55. Phillips, D. J. H. 1977. The use of bioindicator organism to monitor trace metal pollution in marine and estuarine environments. *A review Environmental pollution*. 13, 281-317.
56. Phillips, D. J. H. 1980. Quantitative aquatic biological indicators. Their use to monitor trace metal and organochlorine pollution. *Applied Science Publish Ltd, London*. 460 pp.
57. Stöker, G. 1980. Zu einigen theoretischen und methodischen. Aspekten der Bioindikation. In: Schubert, R., Schuh, J. (Eds.), *Methodische und theoretische Grundlagen der Bioindikation (Bioindikation, 1)* Martin-Luther-Universität, Halle (Saale), GDR, pp.10-21.
58. Kirschbaum, U. and Wirth, V. 1997. Les Lichens Bioindicateurs, Editorial *Ulmer, Stuttgart*. 128 pp.
59. Cecchetti, G. and Conti, M. E. 2000. Monitoraggio biologico della qualità dell'aria: stato dell'arte. *Ambiente, Risorse, Salute, Padova*. 73, 25-30.

60. Epelde, L., Mijangos, I., Becerril, J. M., Garbisu, C. 2008. Soil microbial community as bioindicator of the recovery of soil functioning derived from metal phytoextraction with sorghum. *Soil Biology and Biochemistry*. Article in Press.
61. Moscatelli, M. C., Lagomarsino, A., Marinari, S., De Angelis, P., Grego, S. 2005. Soil microbial indices as bioindicators of environmental changes in a poplar plantation. *Ecological Indicators*. 5, 171-179.
62. Sicardi, M., Garcia-Préchac, F., Frioni, L. 2004. Soil microbial indicators sensitive to land use conversion from pastures to commercial *Eucalyptus grandis* (Hill ex Maiden) plantations in Uruguay. *Applied Soil Ecology*. 27, 125-133.
63. Zhang, Y., Zhang, H. W., Zhen-Cheng, S. and Cheng-Gang, Z. 2008. Soil microbial characteristics under long-term heavy metal stress: a case study in Zhangshi wastewater irrigation area, Shenyang. *Pedosphere*. 18, 1-10.
64. Gillison, A. N., Jones, D. T., Susilo, F. X., Bignell, D. E. 2003. Vegetation indicates diversity of soil macroinvertebrates: a case study with termites along a land-use intensification gradient in lowland Sumatra. *Organism Diversity and Evolution*. 3, 111-126.
65. Nahmani, J. and Jean-Pierre, R. 2003. Soil macroinvertebrates as indicators of pollution by heavy metals. *C. R. Biologies*. 326, 295-303.
66. Sharma, R. C., Jitendra, S. R. 2008. Monitoring of aquatic macroinvertebrates as bioindicator for assessing the health of wetlands: A case study in the central Himalayas, India. *Ecological Indicators*. 9, 118-128.
67. Hédouin, L., Pringault, O., Metian, M., Bustamante, P., Warnau, M. 2007. Nickel bioaccumulation in bivalves from the New Caledonia Lagoon: Seawater and food exposure. *Chemosphere*. 66, 1449-1457.
68. Hédouin, L., Bustamante, P., Churlaud, C., Fichez, R., Warnau, M., 2008. Trends in concentrations of selected metalloid and metals in two bivalves from the coral reefs in the SW lagoon of New Caledonia. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 72, 372-381.
69. Robert, T. A., Cringan, M. S., Chamberlain, D. L., Stahl, A. J., Haslouer, S. G., Goodrich, C. A. 2007. Residual effects of lead and zinc mining on freshwater mussels in the Spring River Basin (Kansas, Missouri, and Oklahoma, USA). *Science of the Total Environment*. 384, 467-496.

70. Hart, K., Kurunthachalam, K., Lin, T., Shin, T., Shinsuke, T. 2008. Skipjack tuna as a bioindicator of contamination by perfluorinated compounds in the oceans. *Science of the Total Environment*. 403, 215-221.
71. Kerigh, H. A., Howard, B. M., Malm, O. 2008. Methylmercury in a predatory fish (*Cichla* spp.) inhabiting the Brazilian Amazon. *Environmental Pollution*. 154, 68-76.
72. Rossini Oliva, S. and Fernández Espinosa, A. J. 2007. Monitoring of heavy metals in topsoils, atmospheric particles and plant leaves to identify possible contamination sources. *Microchemical Journal*. 86, 131-139.
73. Lehndorff, E., Urvat, M., Schwark, L. 2006. Accumulation histories of magnetic particles on pine needles as function of air quality. *Atmospheric Environment*. 40, 7082-7096.
74. Lehndorff, E. and Schwark, L. 2008. Accumulation histories of major and trace elements on pineneedles in the Cologne Conurbation as function of air quality. *Atmospheric Environment*. 42, 833-845.
75. Dmowski, K., 2000. Environmental monitoring of heavy metals with magpie (*Pica pica*) feathers- an example of Polish polluted and control areas. *Trace Metals in the Environment*. 4, 455-477.
76. Husain, M. M, Kaphalia, B. S. 1990. Bioconcentration of cadmium, Manganese and lead in some common species of wild birds from Lucknow city. *J. Environmental Biology*. 11, 193-201.
77. Loumbourdis, N. S, 1997. Heavy metal contamination in a lizard *Agama stellio stellio*, compared in urban, high altitude and agricultural, low altitude areas of north Greece. *Environmental Contamination and Toxicology*. 58, 945-952.
78. Álvarez, R., Medellín, J., Gómez de Silva, H. y Oliveras de Ita, A. 2005. *Hemidactylus frenatus*. Vertebrados superiores exóticos en México: diversidad, distribución y efectos potenciales. Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México. Bases de datos SNIB-CONABIO. Proyecto U020. México. D. F.
79. Burguer, J., Campbell, R. K. and Campbell, T. S., 2004. Gender and Spatial patterns in metal concentrations in brown anoles (*Anolis Sagrei*) in Southern Florida, USA. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 23, 712-718.
80. Kaur, S., 1988. Lead in the scales of cobras and wall lizards from rural and urban areas of Punjab, India. *Science of the Total Environment*. 77, 289-290.

81. Lee, J. C. 1996. The amphibians and reptiles of the Yucatan Peninsula. Comstock Publishing Associates Cornell University Press. Ithaca, Nueva York, EUA, 500 pp.
82. Schmidt-Ballardo, W. y Mendoza-Quijano, F. 1996. Range extensions for *Hemidactylus frenatus* in Mexico. *Herpetological Review*. 27, 40 pp.
83. Fletcher, D. E., Hopkins, W. A., Saldaña, T., Baionno, J. A., Arribas, C., Standora, M. M. and Fernández-Delgado, C. 2006. Geckos as indicators of mining pollution. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 25(9), 2432-2445.
84. Smith, P. N., Coob, G. P., Godard-Codding, C., Hoff, D., McMurry, S. T., Rainwater, T. R., Reynolds, K. D. 2007. Contaminant exposure in terrestrial vertebrates. *Environmental Pollution*. 150, 41-64.
85. González de la Vega, J. P. 1988. Anfibios y reptiles de la provincia de Huelva. Ertisa, Huelva. Enciclopedia virtual de los vertebrados españoles. Museo Nacional de ciencias Naturales SCIC. www.vertebradosibericos.org/anfibios/bibliografia/pelibebi.html
86. Martínez-Rica, J. P. 1974. Contribución al estudio de la biología de los gecónidos ibéricos (Reptil Sauria). Publicaciones del Centro Pirineo. *Biología Experimental*. 5, 1-291.
87. Rieppel, O. 1981. *Tarentola mauritanica* (Linnaeus, 1758) - Mauergecko. *Handbuch der Reptilien und Amphibien Europas*. 1, 119-133.
88. Salvador, A. 1998. *Tarentola mauritanica* (Linnaeus, 1758). En: Reptiles. Salvador, A. (Coord.). Museo Nacional de Ciencias Naturales, Madrid. *Fauna Ibérica*. 10, 142-148.
89. Franco, A. 1980. Nuevo dato sobre herpetofagia en *Tarentola mauritanica*. Doñana, *Acta Vert.* 7: 262.
90. Paracuellos, M., Nevado, J. C. 2004. *Tarentola mauritanica mauritanica* (Moorisch Gecko). *Herpetological Review*. 35 (2), 189.
91. Hódar, J. A. 2002. *Tarentola mauritanica* (Linnaeus, 1758). Salamanca común. Dirección General de Conservación de la Naturaleza-Asociación Herpetológica Española, Madrid. *Atlas y Libro Rojo de los Anfibios y Reptiles de España*. 188-190.
92. Hódar, J. A. (2002b). *Tarentola mauritanica* (Linnaeus, 1758). Salamanca común. Segunda impresión. Dirección General de Conservación de la

- Naturaleza-Asociación Herpetológica Española, Madrid. *Atlas y Libro Rojo de los Anfibios y Reptiles de España*. 188-190.
93. Pleguezuelos, J. M. and Villafranca, C. 1997. Distribución altitudinal de la herpetofauna ibérica. Distribución y biogeografía de los anfibios y reptiles en España y Portugal. Asociación Herpetológica Española y Universidad de Granada, Granada. 321-341
 94. Lizana, M., Ciudad, M. J., Gil, M., Guerrero, F., Pérez-Mellado, V., Martín-Sánchez, R. 1992. Nuevos datos sobre la distribución de anfibios y reptiles en el macizo central de la Sierra de Gredos. *Revista. Española de Herpetología*. 6, 61-80.
 95. Valverde, J. A. 1967. Estructura de una comunidad mediterránea de vertebrados terrestres. Monografías de Ciencias Moderna, 76. CSIC, Madrid.
 96. SMN, 2006. http://www.puertodetampico.com.mc/new_site/clima.html. <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/Tam/Poblacion/default.aspx?tema=ME&e=28>
 97. Márquez-Ferrando, R., Santos, X., Pleguezuelos, J. M. and Ontiveros, D. 2008. Bioaccumulation of Heavy Metals in the Lizard *Psammotromus algirus* After a Tailing-Dam Collapse in Aznalcóllar (Southwest Spain). *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 56, 276-285.
 98. Burguer, J., Gochfeld, M., Shukla, T., Jeitner, C., Burke, S., Donio, M., Shukla, S., Snigaroff, R., Snigaroff, D., Stamm, T., Volz, C. 2007. Heavy Metals in Pacific Cod (*Gadus macrocephalus*) from the Aleutians: Location, Age, Size, and Risk. *Journal of Toxicology and Environmental Health. Part A*, 70. 1897-1911.
 99. Burguer, J., Gochfeld, M., Shukla, T., Jeitner, C., Burke, S., Stamm, T. 2007. Metal levels in flathead sole (*Hippoglossoides elassodom*) and great sculpin (*Myoxocephalus polyacanthocephalus*) from Adak Island, Alaska: Potential risk to predators and fishermen. *Environmental Research*. 103, 62-69.
 100. Zalupus, R. K. and Ahmad, S. 2003. Molecular handling of cadmium in transporting epithelia. *Toxicology Applied Pharmacol*. 186, 163-188.
 101. Loumbourdis, N. S., Kostaropoulus, I., Theodoropolou, B., Kalmanti, D. 2007. Heavy metal accumulation and metallothionein concentration in the frog *Rana ridibunda* after exposure to chromium or a mixture of chromium and cadmium. *Environmental Pollution*. 145, 787-792.

102. Burger, J. and Snodgrass, J., 2001. Metal levels in Southern leopard frogs from the Savannah River site: location and body compartment effects. *Environmental Research Section A*. 86, 157-166.
103. Karar, K., Gupta, A.K., Kumar, A. and Biswas, A.K., 2006. Characterization and identification of the sources of Chromium, Zinc, Lead, Cadmium, Nickel, Manganese and Iron in PM10 particulates at the two sites of Kolkata, India. *Environmental Monitoring and Assessment*. 120, 347-360.
104. Agency for Toxicity and Substances and Disease Registry (ATSDR), 2005. Reseña Toxicológica del níquel. CASO N° 7440-02-0.
105. Thomas, S. and Morawska, L., 2002. Size-selected particles in an urban atmosphere of Brisbane, Australia, *Atmospheric Environment*. 36, 4277-4288.
106. Chow, J.C., Watson, J.G., Huhns, H., Etyemezian, V., Lowenthal, D.H., Crow, D., Kohl, S.D., Engelbrecht, J.P., and Green, M.C., 2004. Source profiles for industrial, mobile and area sources in the Big Bend Regional Aerosol Visibility and Observational study. *Chemosphere*. 54, 185-208.
107. Schmidt, J. 1984. Heavy metal analysis in *Hemidactylus mabouia* (Geckonidae) as a method to classify urban environmental quality. *Amazoniana* 9, 35-42.
108. Bjorn ,A., Mwase, M., Siversten, T., Musonda, M. M., Flaoyen, A. 2005. Hepatic and renal concentrations of 10 trace elements in crocodiles (*Crocodylus niloticus*) in the Kafue and Luangwa rivers in Zambia. *Science of the Total Environment*. 337, 75-82.
109. Moreno, T., Querol, X., Alastueya, A., Viana, M., Salvador, P., Sánchez de la Campa, A., Artiñano, B., De la Rosa, J., Gibbons, W. 2006. Variations in atmospheric PM trace metal content in Spanish towns: Illustrating the chemical complexity of the inorganic urban aerosol cocktail. *Atmospheric Environment*. 40, 6791-6803.
110. Alastuey, A., Querol, X., Plana, F., Viana, M., Ruiz, C. R., Sánchez de la Campa, A., De la Rosa, J., Mantilla, E., García dos Santos, S. 2006. Identification and Chemical Characterization of Industrial Particulate Matter Sources in Southwest Spain. *Air and Waste Management Association*. 56, 993-1006.
111. Avery, R.A., White, A.S., Martin, M.H., Hopkin, S.P. 1983. Concentrations of heavy metals in common lizards (*Lacerta vivipara*) and their food and their environment. *Amphibian-Reptilia* 4, 205-213.

112. Montgomery, D.C. 2001. Design and Analysis of Experiments. Publishing house John Wiley and Sons. Inc. Fifth Edition. 37-38. ISBN: 0-471-31649-0

APÉNDICES

Apéndice B.

Resultados de la prueba de Normalidad (paramétrica), para ambas especies *Hemidactylus frenatus* y *Tarentola mauritanica*.

Resultados del test de Saphiro-Wilk en la especie *Hemidactylus frenatus*.

Datos sin tracto digestivo		
Metal	Valores sin transformar	Valores transformados Log 10
	p-value	p-value
Pb	0.087	0.001
V	0.079	0.047
Ni	0.382	0.008
Cu	0.993	0.939
Zn	0.021	0.003
Cd	0.001	0.000
Mn	0.001	0.001

Datos con tracto digestivo		
Metal	Valores sin transformar	Valores transformados Log 10
	p-valor	p-valor
Pb	0.000	0.002
V	0.075	0.060
Ni	0.501	0.050
Cu	0.228	0.152
Zn	0.928	0.578
Cd	0.001	0.001
Mn	<0.0001	<0.0001

p-valor unilateral: Probabilidad bajo la hipótesis nula de obtener un resultado tan extremo como lo observado, hacia la derecha de la distribución. Se rechaza la hipótesis nula cuando la probabilidad es inferior al umbral Alfa.

Conclusión: para p-valor > 0.050
Al umbral de significación Alfa=0.050 no se puede rechazar la hipótesis nula según la cual la muestra sigue una ley normal.

Dicho de otro modo, la no-normalidad no es significativa.

Conclusión: para p-valor < 0.050
Al umbral de significación Alfa=0.050 se puede rechazar la hipótesis nula según la cual la muestra sigue una ley normal.

Dicho de otro modo, la no-normalidad es significativa.

Resultados del test de Saphiro-Wilk en la especie *Tarentola mauritanica*.

Tracto digestivo		
Metal	Valores sin transformar	Valores transformados Log 10
	p-valor	p-valor
Li	0.004	0.120
B	0.000	0.966
V	0.193	0.747
Cr	0.913	0.700
Ni	<0.0001	0.131
Cu	0.000	0.372
Zn	0.557	<0.0001
As	<0.0001	0.005
Se	<0.0001	0.003
Rb	0.847	0.010
Sr	<0.0001	0.132
Sn	<0.0001	0.124
Sb	<0.0001	<0.0001
Ba	<0.0001	0.120
Pb	<0.0001	0.464

Cuerpo sin tracto digestivo y sin cola		
Metal	Valores sin transformar	Valores transformados Log 10
	p-valor	p-valor
Li	<0.0001	<0.0001
B	<0.0001	<0.0001
V	0.002	0.010
Cr	<0.0001	<0.0001
Ni	<0.0001	0.000
Cu	<0.0001	0.000
Zn	0.002	0.521
As	<0.0001	<0.0001
Se	0.004	0.005
Rb	0.916	0.799
Sr	0.977	0.057
Sn	0.175	0.435
Sb	<0.0001	<0.0001
Ba	<0.0001	0.026
Pb	<0.0001	0.128

Colas		
Metal	Valores sin transformar	Valores transformados Log 10
	p-valor	p-valor
Li	<0.0001	<0.0001
B	0.003	0.451
V	<0.0001	<0.0001
Cr	0.080	0.293
Ni	<0.0001	0.147
Cu	<0.0001	0.092
Zn	0.000	0.707
As	<0.0001	<0.0001
Se	<0.0001	<0.0001
Rb	0.001	0.462
Sr	0.001	0.677
Sn	0.002	0.901
Sb	<0.0001	<0.0001
Ba	0.001	0.447
Pb	<0.0001	0.003

Sin tracto digestivo		
Metal	Valores sin transformar	Valores transformados Log 10
	p-valor	p-valor
Li	<0.0001	0.000
B	<0.0001	0.002
V	0.029	0.014
Cr	0.031	0.138
Ni	<0.0001	0.156
Cu	0.000	0.066
Zn	0.001	0.572
As	<0.0001	0.549
Se	0.044	0.007
Rb	0.001	0.447
Sr	0.777	0.119
Sn	0.001	0.207
Sb	<0.0001	0.895
Ba	<0.0001	0.017
Pb	<0.0001	0.083

Con tracto digestivo		
Metal	Valores sin transformar	Valores transformados Log 10
	p-valor	p-valor
Li	0.003	0.142
B	<0.0001	0.001
V	0.014	0.646
Cr	0.008	0.880
Ni	<0.0001	0.320
Cu	<0.0001	0.020
Zn	0.001	0.704
As	<0.0001	0.884
Se	0.026	0.053
Rb	0.794	0.498
Sr	0.996	0.016
Sn	<0.0001	0.010
Sb	<0.0001	0.001
Ba	<0.0001	0.015
Pb	0.000	0.194

p-valor unilateral: Probabilidad bajo la hipótesis nula de obtener un resultado tan extremo como lo observado, hacia la derecha de la distribución. Se rechaza la hipótesis nula cuando la probabilidad es inferior al umbral Alfa.

Conclusión: para p-valor > 0.050
Al umbral de significación Alfa=0.050 no se puede rechazar la hipótesis nula según la cual la muestra sigue una ley normal.
Dicho de otro modo, la no-normalidad no es significativa.

Conclusión: para p-valor < 0.050
Al umbral de significación Alfa=0.050 se puede rechazar la hipótesis nula según la cual la muestra sigue una ley normal.
Dicho de otro modo, la no-normalidad es significativa.

Apéndice C.

Resultados de la prueba de Homogeneidad, Independencia y Aditividad (no-paramétrica), para ambas especies *Hemidactylus frenatus* y *Tarentola mauritanica*.

Resultados del test de Bartlett en la especie *Hemidactylus frenatus*.

Datos sin tracto digestivo		
Metal	Valores sin transformar	Valores transformados Log 10
	p-valor	p-valor
Pb	0.114	0.500
V	0.356	0.447
Ni	0.224	0.002
Cu	0.680	0.820
Zn	0.164	0.671
Cd	Varianza nula datos = 0	Varianza nula datos = 1
Mn	0.039	0.047

Datos con tracto digestivo		
Metal	Valores sin transformar	Valores transformados Log 10
	p-valor	p-valor
Pb	0.111	0.379
V	0.137	0.125
Ni	0.201	0.016
Cu	0.303	0.321
Zn	0.970	0.988
Cd	0.018	0.024
Mn	0.002	0.007

p-valor unilateral: Probabilidad bajo la hipótesis nula de obtener un resultado tan extremo como lo observado, hacia la derecha de la distribución.
Se rechaza la hipótesis nula cuando la probabilidad es inferior al umbral Alfa.

Conclusión: para p-valor > 0.050
Al umbral de significación Alfa=0.050 no se puede rechazar la hipótesis nula de igualdad de las varianzas.

Dicho de otro modo, la desigualdad de las varianzas no es significativa.

Conclusión: para p-valor < 0.050
Al umbral de significación Alfa=0.050 se puede rechazar la hipótesis nula de igualdad de las varianzas

Dicho de otro modo, la desigualdad de las varianzas es significativa.

Resultados del test de Bartlett en la especie *Tarentola mauritanica*

Tracto digestivo		
Metal	Valores sin transformar	Valores transformados Log 10
	p-valor	p-valor
Li	0.101	0.322
B	<0.0001	0.048
V	0.258	0.394
Cr	0.822	0.716
Ni	<0.0001	0.015
Cu	0.445	0.154
Zn	0.099	0.000
As	0.002	0.082
Se	0.059	0.350
Rb	0.616	0.074
Sr	<0.0001	0.044
Sn	0.002	0.922
Sb	0.001	0.008
Ba	<0.0001	0.377
Pb	0.000	0.228

Cuerpo sin tracto digestivo y sin cola		
Metal	Valores sin transformar	Valores transformados Log 10
	p-valor	p-valor
Li	0.631	0.664
B	<0.0001	<0.0001
V	0.039	0.079
Cr	0.159	0.262
Ni	<0.0001	0.029
Cu	0.000	0.03
Zn	0.096	0.783
As	<0.0001	<0.0001
Se	0.637	0.637
Rb	0.524	0.524
Sr	0.758	0.758
Sn	0.679	0.679
Sb	datos= cero	datos=cero
Ba	<0.0001	0.071
Pb	0.005	0.292

Coilas		
Metal	Valores sin transformar	Valores transformados Log 10
	p-valor	p-valor
Li	0.054	0.133
B	0.307	0.618
V	0.024	0.061
Cr	0.352	0.900
Ni	0.001	0.010
Cu	<0.0001	0.061
Zn	0.010	0.084
As	<0.0001	<0.0001
Se	0.523	0.756
Rb	0.001	0.041
Sr	0.041	0.175
Sn	0.329	0.309
Sb	0.170	0.242
Ba	0.117	0.368
Pb	<0.0001	0.017

Sin tracto digestivo		
Metal	Valores sin transformar	Valores transformados Log 10
	p-valor	p-valor
Li	0.893	0.986
B	<0.0001	0.022
V	0.510	0.768
Cr	0.358	0.839
Ni	0.085	0.584
Cu	0.001	0.038
Zn	0.175	0.798
As	<0.0001	0.860
Se	0.298	0.006
Rb	0.002	0.145
Sr	0.756	0.433
Sn	0.172	0.787
Sb	0.166	0.297
Ba	<0.0001	0.033
Pb	0.001	0.250

Con tracto digestivo		
Metal	Valores sin transformar	Valores transformados Log 10
	p-valor	p-valor
Li	0.781	0.814
B	<0.0001	0.009
V	0.106	0.188
Cr	0.039	0.502
Ni	0.003	0.266
Cu	0.050	0.392
Zn	0.086	0.773
As	<0.0001	0.362
Se	0.434	0.187
Rb	0.594	0.916
Sr	0.950	0.121
Sn	0.000	0.068
Sb	<0.0001	0.002
Ba	<0.0001	0.016
Pb	0.062	0.513

p-valor unilateral: Probabilidad bajo la hipótesis nula de obtener un resultado tan extremo como lo observado, hacia la derecha de la distribución.
Se rechaza la hipótesis nula cuando la probabilidad es inferior al umbral Alfa.

Conclusión: para p-valor > 0.050
Al umbral de significación Alfa=0.050 no se puede rechazar la hipótesis nula de igualdad de las varianzas.

Dicho de otro modo, la desigualdad de las varianzas no es significativa.

Conclusión: para p-valor < 0.050
Al umbral de significación Alfa=0.050 se puede rechazar la hipótesis nula de igualdad de las varianzas

Dicho de otro modo, la desigualdad de las varianzas es significativa.

Apéndice D

Resultados del análisis de varianza (ANOVA) para las especies *Hemidactylus frenatus* y *Tarentola mauritanica*.

Hemidactylus frenatus

Metal	Sin tracto digestivo	Con tracto digestivo
	p-valor	p-valor
Pb	0.258	0.386
V	0.559	0.028
Ni	0.173	0.002
Cu	0.265	0.083
Zn	0.003	0.047
Cd	0.155	0.424
Mn	0.604	0.596

Tarentola mauritanica

Metal	Tracto digestivo	Cuerpo sin cola y sin tracto digestivo	Colas	Sin tracto digestivo	Con tracto digestivo
	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor
Li	0.578	0.737	0.709	0.607	0.353
B	0.003	<0.0001	0.213	<0.0001	0.0001
V	0.256	0.603	0.648	0.288	0.490
Cr	0.043	0.276	0.007	0.004	0.031
Ni	0.001	0.142	0.824	0.318	0.006
Cu	0.764	0.075	0.747	0.149	0.526
Zn	0.146	0.275	0.797	0.43	0.201
As	0.271	0.083	0.127	0.208	0.007
Se	0.237	0.119	0.671	0.594	0.015
Rb	0.135	0.168	0.654	0.663	0.125
Sr	0.249	0.074	0.944	0.293	0.049
Sn	0.032	0.658	0.059	0.766	0.067
Sb	0.370	0.612	0.251	0.058	0.026
Ba	0.223	0.002	0.828	0.001	0.006
Pb	0.479	0.242	0.896	0.356	0.466

Se rechaza la hipótesis nula de igualdad de las varianzas cuando p-valor es mayor al umbral Alfa.

Nivel de significancia $\alpha = 0.050$

Conclusión: Para p-valor > 0.050

Los datos no son significativamente diferentes

Conclusión: Para p-valor < 0.050

Los datos son significativamente diferentes.

Apéndice E

Correlaciones para detectar similitudes en la acumulación de metales entre la cola y el cuerpo con tracto digestivo.

Metal	P-valor bilateral
Li	0.311
B	0.742
V	0.183
Cr	0.637
Ni	0.274
Cu	0.395
Zn	0.413
As	0.521
Se	0.310
Rb	0.763
Sr	0.368
Sn	0.984
Sb	0.496
Ba	0.384
Pb	0.840

p-valor bilateral: Probabilidad bajo la hipótesis nula de obtener un resultados tan extremo como lo observado, en los dos extremos de la distribución.

Se rechaza la hipótesis nula cuando la probabilidad es inferior al umbral $\alpha = 0.050$
La distribución siendo simétrica, esta probabilidad es el doble del p-valor unilateral.

Conclusión para p-valor bilateral > 0.050

Al umbral de significación $\alpha = 0.050$ no se puede rechazar la hipótesis nula de ausencia de correlación. Dicho de otro modo la correlación no es significativa.

Apéndice F

Correlación de concentración de metales entre dos partes del cuerpo.

COLA/TRACTO	
Li	NS
B	NS
V	NS
Cr	NS
Ni	NS
Cu	NS
Zn	NS
As	NS
Se	NS
Rb	NS
Sr	NS
Sn	NS
Sb	NS
Ba	NS
Pb	NS

COLA/CUERPO SIN TRACTO Y SIN COLA	
Li	NS
B	NS
V	NS
Cr	NS
Ni	NS
Cu	NS
Zn	NS
As	NS
Se	NS
Rb	NS
Sr	NS
Sn	NS
Sb	NS
Ba	NS
Pb	NS

TRACTO/CUERPO SIN TRACTO Y SIN COLA	
Li	NS
B	NS
V	NS
Cr	NS
Ni	NS
Cu	NS
Zn	NS
As	NS
Se	NS
Rb	NS
Sr	NS
Sn	NS
Sb	NS
Ba	NS
Pb	NS

COLA/CUERPO CON TRACTO	
Li	NS
B	NS
V	NS
Cr	NS
Ni	NS
Cu	NS
Zn	NS
As	NS
Se	NS
Rb	NS
Sr	NS
Sn	NS
Sb	NS
Ba	NS
Pb	NS

Nota: NS= No Significativo

GLOSARIO

1. **Aire Ambiente:** Cualquier porción de la atmósfera no confinada.
2. **Antropogénico:** Efectos, procesos o materiales que son el resultado de actividades humanas a diferencia de los que tienen causas naturales sin influencia humana.
3. **Bio-acumulación:** Proceso de acumulación de sustancias químicas en organismos vivos de forma que estos alcanzan concentraciones más elevadas que las concentraciones en el medio ambiente o en los alimentos.
4. **Bioindicador ó Biomonitor:** Especie vegetal, hongo o animal; o formado por un grupo de especies (grupo eco-sociológico) o agrupación vegetal cuya presencia (o estado) nos da información sobre ciertas características ecológicas, es decir, (físico-químicas, micro-climáticas, biológicas y funcionales), del medio ambiente, o sobre el impacto de ciertas prácticas en el medio.
5. **Combustion:** Reacción química en la que un elemento (combustible) se combina con otro (comburente, generalmente oxígeno en forma de O₂ gaseoso), desprendiendo calor y produciendo un óxido.
6. **Concentración:** Cantidad relativa de una sustancia mezclada con otra sustancia.
7. **Estandares:** Normas que ponen límites en cantidad de contaminantes o emisiones producidas
8. **Fuentes fijas:** Fuentes industriales estacionarias que generan emisiones desde puntos permanentes.
9. **Fuentes móviles:** Se consideran fuentes móviles a todos los vehículos en movimiento que emiten contaminantes.
10. **Geckos:** Familia de saurópsidos (reptiles) escamosos, que incluye especies de tamaño pequeño a mediano que se encuentran en climas templados y tropicales de todo el mundo.
11. **Geogénico:** Relativo a la parte de la geología que trata sobre el origen y la formación de la Tierra
12. **ICP-MS:** Espectrómetro de masas acoplado por plasma inductivamente.

- 13. Inventarios de emisiones:** Es un instrumento estratégico para la gestión de la calidad del aire que permite conocer las fuentes emisoras de contaminantes, así como el tipo y cantidad de contaminantes que emite cada una de ellas.
- 14. Material de referencia certificado:** Es un material de referencia donde una o más de sus propiedades están certificadas por un procedimiento que establece su trazabilidad a una realización de la unidad en la que se expresan los valores de la propiedad. Cada valor certificado viene acompañado de su incertidumbre a un nivel declarado de confianza
- 15. Medición del ambiente:** Medición de la concentración de una sustancia o contaminante, tomada para relacionarla con la cantidad de posible exposición.
- 16. Monitoreo:** Periodo continuo de estudio para determinar el nivel de contaminantes en varios medios, humanos, plantas y animales.
- 17. Partículas:** Partículas finas sólidas o líquidas tales como humo, smog, polvo, encontradas en emisiones o en el aire.
- 18. Sensores remotos:** Equipos que realiza procesamientos e interpretación de datos espectrales para aplicaciones científicas y desarrolla sistemas integrados para analizar la información y producir la cartografía digital.
- 19. Toxicidad:** Medida usada para medir el grado tóxico o venenoso de algunos elementos.
- 20. Tracto digestivo:** Conjunto de órganos (boca, faringe, esófago, estómago, intestino delgado e intestino grueso) encargados del proceso de la digestión , es decir, la transformación de los alimentos para que puedan ser absorbidos y utilizados por las células del organismo.
- 21. Zona industrial:** Espacio territorial en el cual se agrupan una serie de actividades industriales, que pueden o no estar relacionadas entre sí.
- 22. Zona urbana:** Crecimiento urbano, en cuanto a su densidad de población y su extensión, así como por ser emisor de servicios y estar perfectamente dotado de infraestructuras.

ÍNDICE TEMÁTICO

A

Ácido clorhídrico	40
Ácido nítrico	40, 41, 42
Actividad minera	69
Aditividad	43, 44
<i>Agama stellio stellio</i>	58, 80, 92
Aldama	33, 35, 48, 51, 52, 54
Altamira	13, 14, 33, 34, 35, 52, 53, 54
Análisis de Varianza (ANOVA)	44
Análisis estadístico	43
Analizadores o Monitores Automáticos	2, 19, 20
<i>Anolis sagrei</i>	58, 80
Antropogénico	5, 7, 9

B

Bio-acumulación	55, 59, 74
Bioindicador	24, 27, 29, 31, 49, 82, 83, 84, 88
Bioindicadores	2, 3, 4, 5, 12, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 70, 71, 79
Biomonitores cualitativos	25, 26
Biomonitores sensitivos	2, 25
Bonares	36, 38, 69, 70, 73

C

Compañía minera	36, 51, 53
Conglomerados	45, 55, 74
Correlaciones de Pearson	45, 55

D

Dendrograma	45, 75
Digestión abierta	40, 41, 46
Duncan	44, 49, 50, 63, 64, 65

E

Especímenes	38, 39, 42, 48, 49, 51, 57, 59, 61, 68, 73, 75, 77, 78, 82, 83
Extracción de los metales	4, 33, 40, 46

F

Fuentes fijas	13
Fuentes móviles	13

G

Geckos	4, 5, 12, 26, 28, 33, 34, 38, 39, 46, 48, 51, 52, 53, 58, 59, 62, 69, 70, 71, 79, 80, 81, 82, 83, 84
Géneros	48, 58
Geogénico	51, 69, 83

H

<i>Hemidactylus frenatus</i>	3, 4, 5, 12, 26, 27, 28, 38, 39, 40, 42, 44, 48, 49, 50, 53, 54, 55, 57, 62, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 92, 93, 99, 103, 108
Homogeneidad	43, 44
Hornos de fundición	10, 51, 55, 56
Huelva	2, 3, 4, 12, 14, 15, 16, 30, 36, 37, 42, 68, 69, 70, 73, 87, 90, 93

I

ICP-MS	33, 41, 42, 98
Independencia	43, 44
Indicadores biológicos	26
Industria petroquímica	14, 15, 68
Inventarios de emisiones	12

L

<i>Lacerta agilis</i>	58
-----------------------	----

M

Madero	13, 14, 33, 34, 35, 52, 53, 54
Material de referencia certificado TORT-2	4, 46
Material galvanizado	52
Medidores activos	2
Medidores pasivos	2
Metereológicos	11
Métodos de digestión	4, 42, 46
Microondas	40, 41, 42, 46
Microscopio electrónico	8
Microscopio electrónico de barrido	8
Monitoreo	1, 2, 18, 20, 23, 24, 25, 26, 33, 34, 35, 81, 83, 84, 87
Muestreadores Activos	19, 23

N

No paramétricas	43, 44
Normalidad	43, 44, 99, 102
Nuevo Estadio	68, 70, 73

P

Partículas atmosféricas	1, 7, 9, 10
-------------------------	-------------

Partículas suspendidas	6, 7, 8, 11, 12, 29
PM ₁	2
PM ₁₀	1, 2, 6, 7, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 33, 34, 35, 36, 85, 86, 87, 95
PM _{2,5}	2, 6, 7, 12, 13, 14, 15, 16, 85, 86, 87, 89
<i>Podarcis carbonelli</i>	81
Polígono industrial	68, 70
Preparación de muestras	39
Procesos de combustión	52, 68
Pruebas paramétricas	43

R

<i>Rana catesbiana</i>	59, 62
Recuperación de metales	43, 46
Refinación del petróleo	52, 54
Refinerías	52
Río Guadamar	81

S

Sensores remotos	2, 20, 21
Separación de medias	44
Significancia de $p < 0.05$	44
Sitios de muestreo	5, 33, 44, 50, 68, 70
Software XL-STAT	43

T

Tamaulipas	1, 3, 4, 12, 13, 28, 33, 36, 86
Tamos	33, 35, 51, 52, 53, 54, 55
Tampico	2, 13, 14, 33, 34, 35, 36, 52, 53, 54, 55, 86
<i>Tarentola mauritanica</i>	3, 4, 5, 12, 26, 29, 30, 37, 38, 39, 42, 44, 45, 46, 58, 61, 62, 64, 65, 68, 70, 71, 73, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 93, 94, 99, 100, 103, 105, 108
Tejido	4, 5, 21, 25, 41, 42, 46, 48, 49, 50, 53, 54, 55, 56, 61, 62, 64, 65, 75, 76, 80, 82
Toxicidad	1
Tracto digestivo	4, 39, 45, 48, 49, 50, 51, 54, 55, 57, 58, 59, 61, 62, 63, 64, 68, 73, 74, 75, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 99, 100, 101, 102, 103, 105, 106, 107, 108, 110
Tráfico vehicular	7, 34, 37, 51, 52, 53, 55, 68, 69, 70, 74, 80, 82, 83

V

Viento	11, 69, 70
--------	------------

Z

Zona Industrial	37
zonas urbanas	1, 2, 26, 29, 31, 35