



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**EFFECTO DEL DIESEL SOBRE EL
DESARROLLO Y TAMAÑO POBLACIONAL DE
ORTHONYCHIURUS FOLSOMI SCHAEFFER
(COLLEMBOLA: ONYCHIURIDAE) EN
CONDICIONES DE LABORATORIO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

B I Ó L O G A

P R E S E N T A:

GABRIELA REYES LECHUGA



**DIRECTOR DE TESIS:
DRA. ALICIA CALLEJAS CHAVERO**

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX. MARZO 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

HOJA DE DATOS

1. DATOS DEL ALUMNO

Gabriela
Reyes
Lechuga
56457385
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Biología
306181847

2. DATOS DEL TUTOR

Dra.
Alicia
Callejas
Chavero

3. DATOS DEL SINODAL 1

Dr.
José Guadalupe
Palacios
Vargas

4. DATOS DEL SINODAL 2

Dr.
Omar
Ávalos
Hernández

5. DATOS DEL SINODAL 3

M. en C.
Iván Israel
Castellanos
Vargas

6. DATOS DEL SINODAL 4

Dra.
Blanca Estela
Mejía
Recamier

7. DATOS DEL TRABAJO ESCRITO

Efecto del diesel sobre el desarrollo y tamaño poblacional de *Orthonychiurus folsomi* Schaeffer
(Collembola: Onychiuridae) en condiciones de laboratorio
43 P
2017

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México por ser mi *alma mater*, y hacerme puma.

A la Facultad de Ciencias por ser mi segundo hogar en esta etapa universitaria y porque tras horas de enseñanza en sus aulas, de la mano de los profesores, conocí y me formé la mejor y más hermosa profesión que pude encontrar... la Biología.

A la Dra. Alicia Callejas-Chavero por ser mi tutora de tesis, brindarme su amistad y siempre haber estado conmigo en momentos difíciles a lo largo de este proyecto, por mostrarme que aún existe la humanidad. Por toda su ayuda en el trabajo experimental y sus asertivos comentarios y correcciones a este trabajo.

Al Dr. Arturo García Gómez, de quien siempre tuve un apoyo incondicional en el laboratorio y por haberme escuchado en mis momentos de impaciencia, locura y tristeza, Arturo gracias por compartirme tu conocimiento y experiencia, y por todas las ideas que aportaste, así como tus valiosos comentarios y tu ayuda en la revisión del experimento.

Al Dr. José G. Palacios Vargas, por aceptarme como su alumna y brindarme un espacio en el taller de Ecología y Sistemática de Microartrópodos, así como la facilidad de trabajar en el laboratorio, y por sus comentarios, observaciones y sugerencias al inicio y a lo largo del experimento.

A la Dra. Blanca E. Mejía Recamier, quien me aceptó en el laboratorio y me enseñó el oficio, desde hacer montajes de organismos y utilizar los embudos de Berlese-Tullgren, hasta utilizar en microscopio de contraste de fases, gracias Dra. Blanquita por brindarme su amistad y apoyo incondicional.

Al Dr. Omar Ávalos Hernández y al M. en C. Iván I. Castellanos Vargas, quienes aceptaron ser parte del comité tutorial, tomándose la molestia de revisar el escrito y así brindar valiosos comentarios y sugerencias para un mayor enriquecimiento al proyecto.

A los compañeros del laboratorio de Ecología y Sistemática de Microartrópodos que me brindaron muchas veces su ayuda y me transmitieron su conocimiento y experiencia, de verdad les debo mucho, gracias a todos.

DEDICATORIA

Juanita y Gabriel este trabajo es dedicado a ustedes por su cariño y amor que siempre me brindaron, por todo su esfuerzo y sus desvelos para hacer mi vida feliz y responsable, y apoyarme en cada etapa de ella. Por ser mi guía y mí ejemplo a seguir, por enseñarme la importancia de la solidaridad y por su fortaleza que siempre han mostrado, en especial en esta etapa, que sé que vamos a superar juntos como familia.

Mami, papi, gracias por su educación, tolerancia y amor que ahora me toca a mí transmitir.

Daan tú llegaste a ser la alegría de mi niñez y mi cómplice, gracias por todo hermanito te amo muchísimo desde el día que me enteré que estabas en camino y quise ser la primera en conocerte.

A mi más grande amor de toda mi vida, mi bebé hermoso, mi fuente de inspiración y de valentía, eres un niño muy inteligente y creativo Demi Omar, te amo mi toby.

Omar eres la persona más especial en mi vida, a pesar de tantas vivencias, a veces buenas, a veces malas, te quedaste y día a día me has demostrado tus motivos y tu amor, que para mí es invaluable. No sé si exista la pareja perfecta pero tú para mí sí lo eres, no te cambiaría nada, eres mi vida y te amo.

Madrina tía Luz y tío Ray, desinteresadamente me han apoyado y ayudado muchísimo, de verdad este trabajo ha sido muy en parte gracias a ustedes, los quiero por estar ahora con nosotros siempre de nuestra mano.

Mary McGregor y Richi Reyes a ustedes que sin duda siempre me han mostrado su cariño durante este largo camino, por cuidarme siempre desde mi niñez y aun siendo mayor de edad, gracias por sus consejos, palabras de aliento y sin duda su amistad sincera.

Abuelo Ruco, abuelita Bubú, y abuelita mamá Luisa los amo más de lo que puedo expresar, gracias por cuidarme y ahora cuidar a Demi.

A mi abuelita Alicia y mi abuelo Onésimo que desde el cielo sé que me acompañan y están conmigo siempre cuidándome, mis angelitos, algún día sin duda nos volveremos a ver.

A mis mejores amigos que a lo largo de la carrera formaron parte de mis locuras y desvelos, Lupita, Miguel, Lyz los amo, gracias por estar siempre conmigo en mis alegrías pero sobre en mis tristezas, por su apoyo moral e inmoral jeje, su infinita paciencia y sobre todo por su cariño.

A mi cariñito Jair, a equipo Danito, a mi madre Clau, a mi hermana Mutante, sin ustedes la carrera no habría sido igual, muchas gracias por su amistad durante todos estos años, aunque a veces ya no es lo mismo porque casi no nos vemos, a pesar de todo ustedes son muy valiosos y no me gustaría perderlos, los quiero.

A mi Amora, Tere Castañeda de verdad no sé qué habría sido mi vida si nunca hubieras llegado a ella, gracias por tanta risa, aventura, noches de charla, eternas pláticas al teléfono, tardes de crepas y frappes, juegos de billar, etc. etc. todo lo que compartimos, hoy y siempre quiero que estemos juntas y sigamos compartiendo esta vida y su belleza. Claro no puede faltar nuestro cupido, Frank Camilo espicueto, tu alegría y esa fortaleza que te caracteriza te hacen único gracias por tu amistad, te quiero.

A mi comadreja Karen y mi bebé hermoso Mateo que me han dado alegría y unos momentos que no tienen comparación y que solo al tener un ahijado los he podido vivir, gracias.

A mi amiga Naye, que desde la secundaria hemos vivido momentos increíbles y una que otra locura, y a pesar de una y mil razones para alejarnos, nuestras crías, Reni y Demi, nos han vuelto a hacer muy unidas.

A las mejores amigas Angie y Gaby, y a mi comadrita Karli que siempre me han apoyado y mostrado su cariño, y paciencia, gracias por todos estos años de amistad, más los que vienen.

A todos mis compañeros de Río que aguantaron mi genio y me apoyaron en años difíciles, siempre con un buen consejo de ánimo, en especial a mi amiguita Delia, Germán, Pedrito, Memo, Yahir, sobri, botas y Ángel.

A mi nena preciosa Itan Reyes, te quiero chamaquita, siempre vamos a estar juntas.

A todos ustedes que forman una parte muy importante y especial en mi vida, les agradezco el haber compartido este camino conmigo, les dedico este trabajo.

Las especies que sobreviven no son las más fuertes ni las más inteligentes, sino aquellas que se adaptan mejor al cambio.

Charles Darwin (1809-1882).

ÍNDICE

1. Resumen	7
2. Introducción	9
2.1 El suelo, características generales.....	9
2.2 Importancia de la fauna edáfica en la formación del suelo.....	10
2.3 Generalidades de Collembola.....	10
2.4 Morfología de Collembola.....	11
2.5 Contaminación del suelo.....	12
3. Antecedentes	15
4. Justificación	16
5. Hipótesis	17
6. Objetivos	18
6.1 Objetivo general.....	18
6.2 Objetivos particulares.....	18
7. Métodos	18
7.1 Zona de obtención de <i>Orthonychiurus folsomi</i>	18
7.2 Especie de estudio: <i>Orthonychiurus folsomi</i>	19
7.3 Trabajo de campo.....	19
7.4 Trabajo de laboratorio y mantenimiento del cultivo.....	20
7.5 Ciclo de vida.....	21
7.6 Diseño experimental (efecto de la contaminación del suelo con diesel).....	22
8. Resultados	24
8.1 Condiciones óptimas.....	24
8.2 Ciclo de vida.....	24
8.3 Supervivencia.....	26
8.4 Reproducción.....	27
8.5 Fecundidad.....	29
8.6 Tamaño poblacional.....	29
8.7 Estructura poblacional.....	30
9. Discusión	31
10. Conclusiones	36
Literatura citada	37

1. Resumen

El suelo es uno de los ecosistemas más amenazados por las actividades humanas, al provocar cambios en sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Tal es el caso de la contaminación por hidrocarburos, los cuales inhiben la actividad metabólica de los microorganismos edáficos y afectan las tasas de descomposición. El objetivo de este trabajo fue describir el ciclo de vida de *Orthonychiurus folsomi* y evaluar el efecto de siete diferentes concentraciones de diesel sobre su sobrevivencia, fecundidad, tamaño y estructura poblacional en condiciones de laboratorio. Se trabajó con organismos vivos extraídos del campo y cultivados en el laboratorio bajo condiciones controladas. El diseño experimental, consistió en siete tratamientos, cada uno con siete réplicas: testigo (suelo libre del contaminante), suelos contaminados con 2000 mg/kg, 1000 mg/kg, 500 mg/kg, 250 mg/kg, 125 mg/kg y 80 mg/kg de diesel industrial (Pemex). El experimento consistió en colocar en frascos de plástico de 40 ml, 3 g de suelo contaminado con las concentraciones de diesel antes mencionadas. En cada frasco se introdujo a 20 colémbolos de diferentes estadios de desarrollo seleccionados al azar del cultivo previamente establecido, se les alimentó con levadura y se revisaron diariamente, y se registró el número de individuos sobrevivientes de cada uno de los estadios de desarrollo, número de huevos, fecha de oviposición y tiempo de desarrollo, durante seis semanas, posteriormente se cuantificó el número total de organismos y por estadio de desarrollo, y se estimó el tamaño y la estructura de la población. Para averiguar si existía un efecto del diesel sobre la sobrevivencia, tiempo de eclosión y fecundidad, así como diferencias entre tratamientos, los datos fueron analizados con un ANOVA de una vía, y se utilizó el programa PAST. Los datos de sobrevivencia que se presentaron en porcentaje fueron transformados con el arcoseno de la raíz cuadrada de la proporción, después se aplicó una prueba Post-hoc (Tukey). Asimismo, se graficó el número promedio de sobrevivientes por estadio de desarrollo, para conocer el tipo de curva de supervivencia para la especie. Para evaluar el efecto del diesel sobre el tamaño poblacional se utilizó un modelo lineal generalizado (regresión log lineal, distribución del error tipo Poisson, corregido por sobre dispersión). Finalmente para averiguar si los datos obtenidos de las estructuras poblacionales por tratamiento dependen del tratamiento (diesel) o es independiente del azar, se realizó una χ^2 , ambos análisis se hicieron en el paquete JMP versión 7.01. Los resultados mostraron que bajo condiciones de $26^{\circ}\text{C} \pm 2$ de temperatura, 100% de HR y total obscuridad, *O. folsomi* completa su desarrollo cuatro semanas después de la eclosión y pasan por cinco estadios de desarrollo

antes de ser adultos. El tipo de curva de supervivencia que presenta es de tipo I. La supervivencia, la fecundidad, el tamaño y la estructura poblacional difirieron significativamente entre tratamientos, en el testigo sobrevivieron más organismos, se registró un mayor número de huevos y se alcanzó un tamaño poblacional mayor en comparación con lo registrado en el tratamiento con mayor concentración de diesel (2000 mg/kg). Estos resultados coinciden con lo reportado para otras especies de colémbolos como *Proisotoma minuta* cuya supervivencia, desarrollo y reproducción se inhibe conforme incrementa la concentración de contaminantes o metales pesados en el suelo. Por lo que podemos decir que concentraciones de diesel en el suelo por arriba de 500 mg/kg afectan el desarrollo y tamaño poblacional de *O. folsomi*, en condiciones de laboratorio.

2. Introducción

2.1. El suelo, características generales

El suelo es un ecosistema muy complejo donde ocurren diversos procesos físicos, químicos y biológicos en los que participa la flora y fauna que lo habita, con variaciones determinadas por las condiciones climáticas del sitio, el drenaje, la historia geomorfológica y el uso de la tierra (Cotler *et al.*, 2007). Está formado por distintos horizontes, los cuales son el resultado de procesos que ocurren por diferentes causas, entre ellas la intemperización, así como la fragmentación de la roca madre por agentes bióticos y abióticos (Aguilera, 1989).

El suelo constituye un recurso natural difícilmente renovable, desempeña funciones como medio filtrante durante la recarga de los mantos acuíferos y la protección de los mismos. Es el lugar donde ocurren los ciclos biogeoquímicos, hidrológicos y las redes tróficas (Saval, 1995). Este sustrato es el sitio donde los restos vegetales y animales se transforman en elementos básicos, que constituyen el medio idóneo para el crecimiento de plantas. Con ello se logra una interacción entre lo biótico y abiótico, y al ser un sistema abierto, hay intercambio de materia y energía con el medio, y se mantiene un continuo flujo de entrada y salida de energía (Jordán, 2005).

Las propiedades del suelo ejercen gran influencia sobre las comunidades vegetales y animales, entre ellas están las químicas; como el pH, salinidad, exceso de agua, compactación, temperatura y profundidad; y físicas, como la textura y porosidad, las cuales son altamente variables (Siebe *et al.*, 1996). Ambas propiedades afectan a la macrofauna y microfauna edáfica, ya que habitan o se alimentan de los productos derivados de éstos o de residuos vegetales (Aguilera, 1989).

La composición química de los suelos es un proceso de formación desde la composición química elemental de la roca madre, por el intemperismo de las rocas se forman; los minerales primarios, los minerales secundarios, sales solubles con sus macronutrientes ionizados Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ y los micronutrientes ionizados Cu^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Co^{2+} , Mn^{2+} y Mo^{2+} y de los aniones se forman los $\text{SO}_4^{=4}$, Cl^- , $\text{CO}_3^{=3}$, HCO_3^- (formas iónicas comúnmente absorbidas por las plantas), fitolitos, óxidos e hidróxidos de fierro, aluminio y arcillas (Aguilera, 1989). La acumulación de la materia orgánica con enriquecimiento de C y N, la pérdida por lixiviación de sus elementos, la disolución de sales, y la diferenciación de minerales estables, especialmente minerales de arcilla (caolinita y óxidos de Fe y Al) llevan a los suelos a un aumento de su contenido de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 (Fassbender, 1975).

2.2 Importancia de la fauna edáfica en la formación del suelo

La fauna edáfica es considerada como uno de los grupos más importantes en la formación del suelo y de su fertilidad, debido a su amplia gama de hábitos alimenticios, ya que consumen y participan en la dispersión de la microbiota edáfica, de ésta forma se mantiene la diversidad biótica (Newell, 1984). Los organismos que habitan el suelo fragmentan la materia orgánica, lo cual permite la lixiviación de los compuestos más solubles, de forma que sea accesible a la acción de bacterias y hongos, quienes juegan un papel muy importante en las redes tróficas, sus actividades influyen en los niveles de producción primaria del ecosistema (Hopkin, 2002).

Los organismos edáficos tienen un papel determinante como desintegradores en la mineralización de la materia orgánica muerta (MOM), por tanto, en la adquisición de los nutrientes por parte de las plantas y en la productividad primaria. Esta fase es muy importante dentro de la descomposición, la cual constituye un aspecto vital en la regulación de los flujos de materia y energía dentro de los procesos dinámicos de los ecosistemas (Barajas, 1996).

La mesofauna se compone por individuos que miden de 0.2 a 2.00 mm, aquí se incluyen una gran diversidad de artrópodos como los ácaros y los colémbolos, quienes representan los grupos faunísticos más abundantes y de mayor importancia dentro del suelo, por su actividad como descomponedores y fragmentadores de la materia orgánica, además de participar en el reciclaje de nutrientes, flujo de energía, formación de suelo (Rusek, 1998; Palacios-Vargas, 2003), y tener una función como indicadores de condiciones precisas del medio (Ponge, 1980).

La fauna edáfica también interviene en la reducción de la compactación del suelo, y en el incremento de la porosidad del suelo, debido a que, mientras se alimentan, aerean y mezclan el suelo, de esta manera se crean canales que aumentan la disponibilidad de recursos de la superficie, el intercambio y renovación de aire, distribución del agua, y transportación de iones. La compactación del suelo ocurre cuando las partículas se encuentran comprimidas unas con otras, lo que reduce el movimiento capilar del agua, la infiltración de agua y aire, inhibiendo así el crecimiento de las raíces y desarrollo de los organismos en el suelo (Aguilera, 1989; Orellana y Pilatti, 1994).

2.3 Generalidades de Collembola

Los colémbolos son hexápodos apterigotos muy pequeños, con una longitud que oscila, en su mayoría, entre 0.2 y 10 mm (Hopkin, 2002). La mayoría se alimenta de hifas de hongos o de material vegetal en descomposición (Palacios-Vargas y Gómez-Anaya, 1993). Existen especies

carnívoras que se alimentan de nematodos, rotíferos, tardígrados, bacterias, protozoarios y de otros colémbolos (Palacios-Vargas y Vidal-Acosta, 1994). Por otra parte tienen gran relevancia en las cadenas tróficas edáficas al constituir el alimento de muchos insectos como hormigas, ácaros, escarabajos y esquizómidos (Rusek, 1998).

Los colémbolos son uno de los grupos de artrópodos más abundantes en el suelo y mantillo (Christiansen, 1992; Hopkin 1997, 2002). En algunos ecosistemas terrestres se encuentran densidades de 10^4 a 10^5 por m^2 (Petersen y Luxton, 1982). Sin embargo, debido a su tamaño pequeño, la contribución de los Collembola a la biomasa animal total del suelo y a la respiración es baja, para ecosistemas templados es del 1-5%, en zonas árticas es cerca del 10%, y en ecosistemas en estados tempranos de sucesión es del 33% (Petersen, 1994).

Por su tipo de alimentación desempeñan un papel relevante en la descomposición de la materia orgánica, controlan las poblaciones de bacterias y hongos, y son muy importantes por su influencia sobre la estructura del suelo, debido a que sus pellets retardan la liberación de los nutrientes esenciales para las plantas y sirven de sustrato para una gran cantidad de microorganismos (Butcher *et al.*, 1971; Palacios-Vargas *et al.*, 2000).

Tienen distribución cosmopolita, se encuentran desde el nivel del mar hasta grandes altitudes. Muchas especies habitan en el suelo y en el dosel de las selvas tropicales (Palacios-Vargas y Thibaud, 1998). Es frecuente encontrarlos en el mantillo, corteza de árboles, hongos, nidos de insectos sociales, de aves y mamíferos, así como en epífitas y en cuevas (Palacios-Vargas, 1981). Y algunos actúan como dispersores de esporas en troncos en descomposición (Palacios-Vargas y Castillo, 1992).

2.4 Morfología de Collembola

Corporalmente se dividen en tres tagmas; cabeza, tórax y abdomen. Su cabeza es ovalada con un par de antenas, que consisten en cuatro segmentos básicos con órganos sensoriales, puede presentar órgano postantenal (PAO) y corneolas. Sus ojos consisten en máximo ocho omatidias simples, sin embargo algunas especies son completamente ciegas (Hopkin, 1997). Sus piezas bucales (mandíbulas y maxilas) pueden ser masticadoras o chupadoras. El tórax se divide en tres segmentos, cada uno con un par de apéndices locomotores. Su abdomen se divide en seis segmentos, dentro de sus características morfológicas distintivas se encuentran la presencia de un tubo ventral o colóforo, que consiste en sacos eversibles derivados de un par de apéndices del primer segmento abdominal, es muy importante en el balance hídrico y le permite la adhesión a superficies resbalosas, de aquí deriva su nombre científico, de acuerdo a las raíces griegas *colla*=

pegamento y *embolon*= tubo (Palacios-Vargas *et al.*, 2000). En el tercer segmento abdominal lleva el tenáculo, que sujeta la fúrcula, que le sirve para brincar, se localiza en el cuarto segmento abdominal, y se compone de tres partes: manubrio, dente y mucrón (Fig. 1) (Jordana *et al.*, 1997).

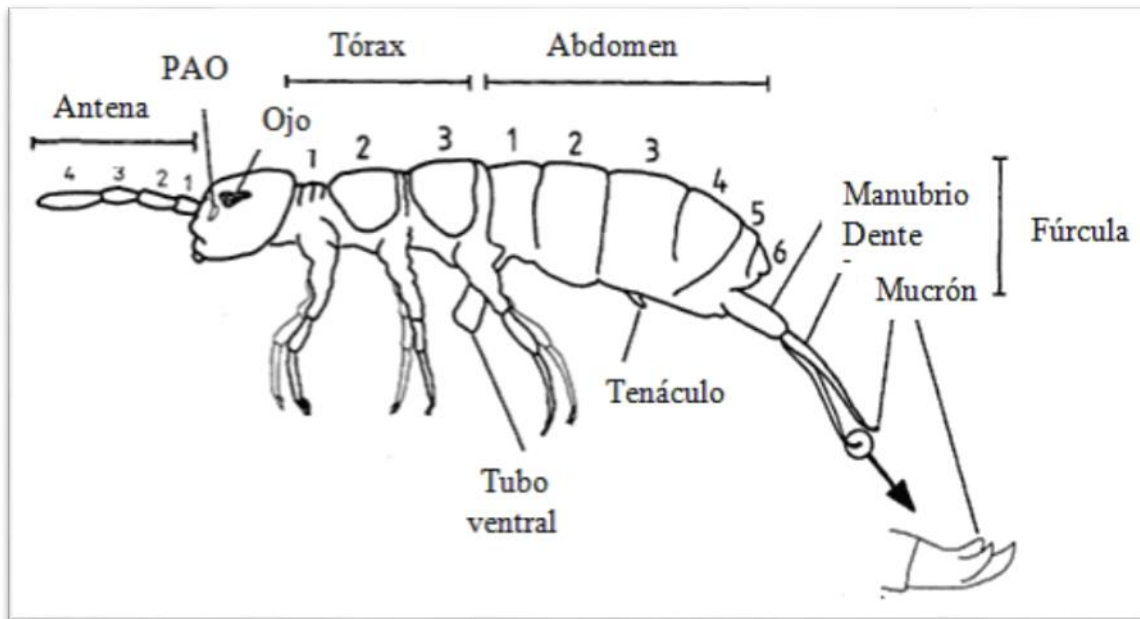


Figura.1. Diagrama esquemático de la estructura corporal de un colémbolo (vista lateral). Modificado de Hopkin (1997).

2.5 Contaminación del suelo

Actualmente, el suelo es un ecosistema amenazado por las actividades humanas, mismas que provocan cambios en las condiciones físicas y químicas del suelo. En términos generales la contaminación del suelo se debe a que en él se depositan diferentes tipos de materiales, por ejemplo, elementos inorgánicos de desechos industriales, como sales, hidrocarburos o metales pesados, entre otros. Además también podemos encontrar compuestos orgánicos como: pinturas, solventes y desechos alimenticios.

Se entiende por contaminación todo aquello que alteró o modificó la composición y condición natural del sustrato, esto al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier otro elemento natural (LEGEEPA, 1987).

La contaminación causada por derrames de petróleo y por hidrocarburos, sobre el suelo son poco frecuentes, pero cuando ocurren suelen ser devastadores llegan a ocasionar graves alteraciones en los sistemas (Ojeda-Morales, 2003). El petróleo es una mezcla compleja de sustancias formadas por restos de animales y vegetales que han estado sometidos a la acción

bacteriana y a la catalítica de algunos compuestos inorgánicos durante millones de años, a consecuencia de esto, el petróleo contiene una gran cantidad de hidrocarburos y los productos que se obtienen de él como la gasolina, el diesel, la parafina, los aceites combustibles y lubricantes (Flores *et al.*, 2004).

Los hidrocarburos son compuestos formados por átomos de Carbono e Hidrógeno, muy abundantes en la naturaleza y afectan la densidad, presión de vapor, coeficiente de partición del suelo, electronegatividad, hidrofobicidad y solubilidad en el agua (Ortíz *et al.*, 2003). La mayoría se extrae de combustibles fósiles, en particular del petróleo, pero también del gas natural y de la hulla (Flores *et al.*, 2004).

La tasa de degradación de los hidrocarburos es difícil y se determina por la complejidad de sus moléculas. Compuestos lineales hasta C30, por ejemplo, pueden desaparecer en un mes, mientras que los de hasta C37 necesitan por lo menos 200 días (Gudin, 1978).

A través de la caracterización química de los contaminantes se ha podido conocer la amplia variedad de los hidrocarburos que inhiben la actividad metabólica de los micro-organismos, mientras que la caracterización fisicoquímica del suelo permite conocer el microambiente donde los microorganismos llevan a cabo su acción metabólica en el proceso de degradación (Saval, 1998).

Los hidrocarburos contaminantes en el suelo pueden encontrarse en diferentes formas: los volátiles están en forma gaseosa y ocupan el espacio poroso, otros como gasolina, diesel, queroseno y turbosina, están adsorbidos en la fase sólida del suelo, penetran inmediatamente y migran verticalmente hacia la profundidad, debido a que tienen una viscosidad menor a la del agua, o bien permanecen en capas superficiales del suelo, por ser más viscosos, como el petróleo crudo, aceites, combustóleos, lodos aceitosos y de perforación (Saval, 1999).

La contaminación por hidrocarburos en particular con diesel según la Norma Oficial Mexicana de Emergencia NOM-EM-138-ECOL-2002, que indica que los límites máximos permisibles de contaminación (valores referidos en base seca) para suelos de uso agrícola, forestal, recreativo, de conservación, y para uso de suelo residencial comercial es de 1,000 mg/kg de Hidrocarburos Totales del Petróleo (HTP), mientras que el límite para el uso de suelo industrial es de 2,000 mg/kg, para HTP.

Los tipos de suelos más comúnmente afectados son los de zonas bajas, mismas que presentan contenidos altos de materia orgánica y arcilla, típicamente Histosoles y Gleisoles. Los menos afectados son, los más aptos para la agricultura, que poseen texturas menos finas, y alta

fertilidad (como los Fluvisoles y algunos Vertisoles). Algunos sitios contaminados se encuentran en la planicie costera, entre suelos arenosos (Regosoles). Aunque el número de estos últimos sitios es mucho menor, es más preocupante su contaminación en términos del impacto probable de acuíferos, debido a su alta permeabilidad (Palma-López *et al.*, 1985).

En el cuadro 1 se muestran las propiedades físicas y químicas del suelo que se ven afectadas por derrames de hidrocarburos (Elías-Murguía y Martínez, 1991).

Cuadro 1. Propiedades físicas y químicas del suelo más afectadas por derrames de hidrocarburos. Modificado de Elías-Murguía y Martínez, 1991.

Propiedades físicas del suelo	Propiedades químicas del suelo
<ul style="list-style-type: none"> ○ La estructura del suelo debido a la ruptura de los agregados (desestabilidad del arreglo y unión de las partículas). ○ Aumento de la retención del agua en la capa superficial (no hay permeabilidad debido a la viscosidad del contaminante, como el petróleo crudo y lodos aceitosos). ○ El potencial hídrico (afecta la circulación del agua disponible). 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Aumento de carbono orgánico, ya que el 75% del carbono del petróleo crudo es oxidable (afecta el rendimiento y capacidad productiva del suelo). ○ Disminución del pH, debido a la acumulación del carbono orgánico y generación de ácidos orgánicos (la acidez del suelo lixivia bases intercambiables de los niveles superficiales de los suelos). ○ Aumento del manganeso y hierro intercambiable (altas concentraciones provocan toxicidad en las plantas). ○ Aumento del fósforo disponible (se inhibe su absorción por parte de las plantas).

Son varias las fuentes de contaminación, pero cuatro de ellas se consideran más comunes: 1) lodos de perforación de tipo inversa y recortes, 2) suelo contaminado por derrames de tuberías corroídas, 3) “tiraderos” de desechos semisólidos, 4) sitios contaminados por descargas de petroquímicas y refinerías (Adams *et al.*, 1999).

Los niveles de contaminación varían mucho según las fuentes de hidrocarburos y la antigüedad de las instalaciones petroleras. En el occidente de México, donde la mayoría de las instalaciones son más antiguas (algunas alrededor de 65 años), es más común tener derrames de hidrocarburos de tubos corroídos (Rodríguez, 1997).

Las afectaciones al suelo por la presencia de hidrocarburos incluyen la pérdida de la capacidad productiva de los suelos, implicaciones sobre los organismos vivos, y económicas

sobre la población del área contaminada, y en consecuencia una alta tasa de pobreza y desempleo (Etuk *et al.*, 2013).

Una investigación realizada por Agbogidi *et al.* (2007) demostró que el efecto de la contaminación de petróleo crudo en el suelo, afectó su fertilidad, el crecimiento de las plantas y la absorción de nutrientes. La germinación de las plantas disminuyó a medida que la contaminación aumentaba. La cantidad de carbono orgánico, nitrógeno total, potasio intercambiable, hierro y manganeso aumentaron en el suelo con niveles altos de contaminación, mientras que el fosfato extraíble y el calcio intercambiable se redujeron. El crecimiento escaso se atribuyó a la asfixia de las plantas a causa de la exclusión de aire por el petróleo, al agotamiento del oxígeno por aumento de la actividad microbiana, a la interferencia de las relaciones suelo-planta-agua, a la toxicidad de los sulfuros y al exceso de manganeso que se producen durante la descomposición de hidrocarburos.

Wokocha *et al.* (2011), examinaron el impacto del derrame del petróleo crudo en las propiedades del suelo, se obtuvo que los pH del suelo en zonas fuertemente contaminadas y zonas moderadamente contaminadas varió de ácido (pH 4.0) a ácido (pH 6.0), la materia orgánica aumentó su porcentaje de 1.34 a 2.62, y el fósforo se redujo de 15 ppm en el control a entre 7.34 y 5.42 en el suelo contaminado con altos niveles de crudo.

3. Antecedentes

Dada la sensibilidad alta que tienen los colémbolos a las alteraciones del medio y a diferentes contaminantes, entre ellos los metales pesados, se han realizado estudios con diversas especies donde evalúan sus efectos en las poblaciones. Nursita *et al.* (2005), trabajaron con la especie *Proisotoma minuta* y evalúan los efectos de diferentes concentraciones de cadmio (Cd), cobre (Cu), plomo (Pb) y zinc (Zn), se obtiene una reducción en la supervivencia de adultos y una reproducción nula en las más altas concentraciones de Cd y Zn. Mientras que para el tratamiento con Pb no se obtuvo un efecto significativo en la mortalidad, lo que indica que *P. minuta* es más tolerante al Pb que a los otros metales. La tasa de crecimiento de los adultos disminuyó en todos los tratamientos de metales en comparación con los controles, lo cual sugiere que la acumulación de metales en esta especie afecta su metabolismo y resulta en una tasa de crecimiento más lento. Por ello se ha propuesto como bioindicadores de las condiciones del suelo donde se desarrollan (Chagnon *et al.*, 2000).

Para especies como *Sinella communis* y *P. minuta*, Greenslade y Vaughan (2003) concluyen que presentan una rápida reproducción en cultivos, al igual que *Folsomia candida*.

Realizaron pruebas de toxicidad donde comparan a las tres especies, incluyen a los metales pesados, por su elevado peso molecular, entre ellos están el Cd, el Cu y el Zn. También incluyen al arsénico (As), y al Pb y a otros compuestos como el nonilfenol, fenol, y 2-cloroacetamida. Con respecto al Cd los individuos juveniles son poco tolerantes a concentraciones altas y su población disminuye rápidamente, al ir en incremento el Cd en el cultivo, de manera que al alcanzar 400 mg/kg, la población prácticamente desaparece. El caso de los adultos es diferente, debido a que son más tolerantes a la concentración de Cd, y al llegar a 50 mg/kg la población comienza a disminuir, pero no de manera abrupta, y al llegar a 800 mg/kg aún se encuentran individuos en el cultivo, a diferencia de los juveniles.

El uso de los colémbolos como indicadores de la calidad y salud de diferentes sustratos, ha sido señalado por varios autores (Frampton, 1997; Kopeszki, 1997; Cutz-Pool *et al.*, 2007), quienes mencionan que algunas especies suelen ser abundantes en las zonas contaminadas, ya que pueden resistir mejor algunos contaminantes y degradarlos, como en el caso de los hidrocarburos (Butcher *et al.*, 1971).

En un trabajo previo realizado por Uribe-Hernández *et al.* (2010), se obtuvo un muestreo de suelos contaminados con hidrocarburos en el sureste de México, donde se encontraron especies de microartrópodos, en particular especies de colémbolos como *Americabrya* sp., *Lepidocyrtus* sp., *Pseudosinella* sp., *Seira* sp., *Willowsia* sp., *Ballistura* ca. *excavata*, *Cryptopygus* ca. *thermophilus*, entre otras, que manifestaron tolerancia a altas concentraciones de hidrocarburos: 28,311 mg/kg y 214,515 mg/kg de Hidrocarburos Totales del Petróleo (HTP), y se observó que la diversidad de colémbolos es afectada por la presencia de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP), mientras que el pH, la materia orgánica, los cationes intercambiables (Mg^{2+} , Na^{+}) y los hidrocarburos del suelo afectan la composición y abundancia de las comunidades de colémbolos.

4. Justificación

Se han realizado diversos trabajos con microartrópodos, en particular con diferentes especies de colémbolos, donde se evalúa la sensibilidad de los organismos a diferentes niveles de toxicidad, se utilizan metales pesados, principalmente cadmio, cobre, plomo y zinc, o una combinación de estos metales.

Los colémbolos están adaptados para tolerar metales pesados, debido a que tienen la capacidad de bioacumular en sus cutículas algunas sustancias, e incluso los productos de su metabolismo modifican las condiciones mismas, al permitir la agregación de partículas

(Palacios-Vargas y Castaño-Meneses, 2014), sin embargo, su resistencia y efectos a compuestos orgánicos, como los hidrocarburos, a diferentes concentraciones, sobre su sensibilidad, no ha sido bien estudiada, únicamente se ha documentado que ciertas especies presentan tolerancia (Hopkin *et al.*, 1989; Battigelli y Marshall, 1993).

El colémbolo *Folsomia candida* es un modelo para la toxicología genómica del suelo, los perfiles de expresión de sus genes expuestos a tóxicos ambientales permiten la detección rápida y sensible de los efectos de la contaminación, y además, aclara los mecanismos moleculares que causan la intoxicación (Hopkin, 1997). Se ha demostrado que la expresión de ciertos genes es un indicador de contaminación con metales pesados en suelos (Nota *et al.*, 2011).

La destrucción y alteración del hábitat de las especies, se produce mayormente por actividades humanas, si se tiene en cuenta que las consecuencias de la degradación biológica implican una pérdida de las propiedades del suelo, y disminuye su fertilidad y su capacidad para producir bienes y servicios, a través de este tipo de estudios se busca conocer los efectos de la sensibilidad de los organismos a diferentes concentraciones de hidrocarburos, y su afectación al hábitat donde se encuentren. Información muy valiosa ya que se puede emplear para establecer programas de recuperación de la fertilidad en el suelo tanto en condiciones naturales como en sistemas artificiales (cultivos o bosques) o modificar los límites establecidos en la NOM-EM-138-ECOL-2002 como adecuados.

5. Hipótesis

De acuerdo con lo reportado en la literatura se sabe que a mayor contaminación de diesel en el suelo cambian algunas de sus propiedades. Por ejemplo, disminuye el pH, se reduce la porosidad, aumenta la retención de agua y concentración de elementos como el C, Mg y P, factores que afectan la sobrevivencia y la dinámica de las poblaciones de *Orthonychiurus folsomi*, por lo que se espera que en las altas concentraciones de diesel, la sobrevivencia, fecundidad, reproducción y desarrollo de estos organismos se vean afectados y la tasa de mortalidad sea elevada, mientras que en concentraciones bajas la tasa de mortalidad sea baja y dichos parámetros no se vean afectados.

6. Objetivos

6.1 Objetivo general

Describir el ciclo de vida de *O. folsomi* y evaluar el efecto de siete diferentes concentraciones de diesel sobre su sobrevivencia, fecundidad, tamaño y estructura poblacional en condiciones de laboratorio.

6.2 Objetivos particulares

- 1) Determinar las condiciones óptimas (humedad relativa, fotoperiodo y temperatura) para el desarrollo de *O. folsomi* en condiciones controladas.
- 2) Describir el ciclo de vida de *O. folsomi* en condiciones controladas.
- 3) Evaluar el efecto de siete diferentes concentraciones de diesel sobre la sobrevivencia, fecundidad, tamaño y estructura poblacional de *O. folsomi* en condiciones de laboratorio.

7. Métodos

7.1 Zona de obtención de *Orthonychiurus folsomi*

Para el diseño experimental fue necesario obtener organismos vivos del género en estudio, en un área localizada al poniente de la Ciudad de México, en el interior del Bioparque Urbano San Antonio, cuyas coordenadas son 19°23'N, 99°11'O, con una altitud de 2,250 m s.n.m., y corresponde a la dirección Av. Central 300, Col. Carola, Del. Álvaro Obregón, C.P. 01180, Cd.Mx.

Dentro de la vegetación domina el estrato arbóreo, aunque también hay un estrato arbustivo y otro herbáceo. Entre las especies enlistadas están: el encino quiebra hacha (*Quercus rugosa*), el tepozán (*Buddleja cordata*), el pirul (*Schinus molle*), la pata de vaca (*Bauhinia variegata*), *Acacia retinodes*, *Liquidámbar styraciflua*, y *Jacaranda mimosifolia* (Libro Blanco, 2012).

Los sitios de colecta (Fig. 2) se ubicaron lejos del sendero principal.



Figura 2. Vegetación del sitio de colecta, al interior del Bioparque Urbano San Antonio.

El tipo de suelo es Pheozem hápico y lúvico, es un suelo que presenta una secuencia normal en sus horizontes, con un espesor máximo de 100 cm. El clima es templado, la temperatura media anual varía de 14.9 a 17.1 °C durante los meses de abril a junio; la temperatura mínima se da en los meses de diciembre a febrero y alcanza los 10 °C. La precipitación anual máxima corresponde a los meses de junio a septiembre y la mínima, en los meses de noviembre a febrero, entre 1,000 y 1,200 mm anuales. El relieve comprende llanuras y lomeríos, sus pendientes son de 1.5° (PROGRAMA Delegacional de Desarrollo Urbano de Álvaro Obregón, 1997).

7.2. Especie de estudio: *Orthonychiurus folsomi*

Se trata de una especie de tamaño pequeño, cuerpo alargado, de hasta 1.9 mm de longitud, sin pigmento cuticular evidente. Son organismos euedáficos ocupan el espacio intersticial entre las partículas del suelo, debajo de las rocas y de la madera podrida. Las características diagnosticas incluyen la ausencia de ocelos, el Órgano Pos Antenal (PAO) es elíptico con 10-12 vesículas complejas, la ausencia de espinas anales, el órgano sensorial dorsal se encuentra en el tercer segmento antenal y presenta cuatro papilas, el unguis presenta un pequeño diente, el unguiculus es un poco más corto que el unguis y no tiene lamella, el tubo ventral en el macho consiste en cuatro sedas modificadas en el segundo segmento abdominal (Hopkin, 2006).

O. folsomi (Fig. 3) está distribuida en todo el mundo, en el continente americano se encuentra principalmente en el centro y norte de América (Bellinger *et al.*, 2017).



Figura 3. Especimen de *O. folsomi* adulto.

En México se ha reportado en: el Rancho San Francisco del Arenal en Aguascalientes, Gruta de Aguacachil y Grutas de Acuitlapan en Guerrero, Guadalajara en Jalisco y Yecapixtla en Morelos (Delgado, 2010), para la Ciudad de México se ha reportado en el Bosque de Tlalpan y el Pedregal de San Ángel (Palacios-Vargas, 2016).

Se eligió a esta especie porque tiene una amplia distribución (incluyendo sitios contaminados con hidrocarburos), suele ser abundante en los sitios donde se encuentra y al ser detritívora, juega un papel muy importante en el reciclaje de nutrientes del suelo. Además de que tiene un ciclo de vida corto, una tasa de reproducción alta, es de fácil manejo en laboratorio, y no hay estudios ecológicos de esta especie relacionados con el tema para México.

7.3 Trabajo de campo

Se llevaron a cabo dos muestreos uno en la temporada de lluvias y otro en secas, junio y agosto de 2014 respectivamente, en cada muestreo, se ubicaron dos sitios de colecta en zonas alejadas del sendero principal, en cada sitio se trazó un cuadro de 1 m por 1 m, dentro del cual se recolectó en cuatro puntos diferentes 1 kg de mantillo, mismo que se guardó en bolsas de plástico, previamente etiquetadas. Posteriormente se separaron en cuatro porciones de 250 g y cada una se procesó en el embudo de Berlese. Se obtuvieron a los organismos vivos en frascos de cultivo, durante 5 días, y se remplazaron los frascos cada 24 h.

7.4 Trabajo de laboratorio y mantenimiento del cultivo

De acuerdo con lo reportado en la literatura la temperatura ideal para el desarrollo del *O. folsomi* es de $24^{\circ}\text{C} \pm 2$, a una humedad de 70% y no hacen ninguna especificación con respecto al fotoperiodo. Para este estudio los organismos obtenidos del campo se colocaron en las

condiciones antes mencionadas, sin embargo el tiempo transcurrido para la eclosión fue en promedio 8 ± 2 días y su desarrollo se completó en promedio en 8 semanas.

Sin embargo, haciendo algunas modificaciones como utilizar un medio de cultivo con una base de una mezcla de yeso y carbón activado (9:1) sobre la que se colocó una capa de 3 g de suelo, a una temperatura de $26^{\circ}\text{C} \pm 2$, humedad relativa al 100% y total obscuridad, el tiempo a de eclosión, se redujo a 3 ± 2 días y el desarrollo se completó a las 4 semanas, lo cual permitió tener tamaños poblacionales de más de 300 individuos por frasco, en menos tiempo, asegurando así tener el número suficiente de organismos para el experimento. Para mantener las condiciones necesarias para el desarrollo de los organismos se utilizó una incubadora marca HINOTEK, modelo MGC-450HPY-2.

Los cultivos se revisaron dos veces por semana durante 6 meses. Los organismos fueron alimentados con mantillo proveniente del mismo sitio de colecta, el cual se agregó de manera directa sin alterar o fragmentarse, aproximadamente cada 12 días. También se les adicionó agua (2 o 3 ml), cada dos o tres semanas según fue necesario. De manera paralela, si el número de organismos excedía más de 300, se sacaron algunos, y se colocaron en otros frascos con menor número de individuos. De manera simultánea, con la intención de evitar problemas de endogamia en el cultivo y que esto pudiera afectar los resultados del experimento se hacían colectas de suelo cada cuatro semanas y agregaban organismos nuevos al cultivo, esto se hizo, durante las primeras 12 semanas.

7.5 Ciclo de vida

Una vez encontradas las condiciones óptimas (temperatura, humedad relativa y fotoperiodo) se procedió a describir el ciclo de vida. En 16 frascos (réplicas) se colocaron a 20 individuos adultos, se mantuvieron con mantillo del sitio de colecta y una vez por semana se les agregaba 15 microples (5 mg) de levadura de pan y 2 o 3 ml de agua. Se dejó transcurrir el tiempo necesario hasta que se registró la presencia de puestas, se procedió a contar el número de huevos en cada una de ellas, posteriormente, se extrajeron los adultos con la intención de no alterar la puesta, y poder darle seguimiento a los huevos. Todos los frascos se revisaron diariamente y cada día se registró la presencia de nuevos organismos, mismos que se separaban por fecha de eclosión, se registró el número de días que pasaban por cada estadio de desarrollo hasta que llegaron a ser adultos.

De manera simultánea para distinguir a los organismos por estadio de desarrollo y averiguar por cuantos estadios pasan hasta llegar adultos, se sacó de los frascos al azar 45 individuos de cada estadio, para hacer preparaciones semipermanentes en líquido de Hoyer, y medirlos en un microscopio óptico Carl Zeiss.

7.6 Diseño experimental (efecto de la contaminación del suelo con diesel)

El diseño experimental, consistió en siete tratamientos: Testigo (suelo libre del contaminante), suelos contaminados con 2000 mg/kg, 1000 mg/kg, 500 mg/kg, 250 mg/kg, 125 mg/kg y 80 mg/kg de diesel.

Los criterios para seleccionar las concentraciones de diesel anteriores, se debieron a que se encuentran en los límites máximos permisibles de contaminación en suelos según la NOM-EM-138-ECOL-2002, que es de 2,000 mg/kg para suelo industrial, y 1,000 mg/kg para suelo de uso agrícola, forestal, recreativo y de conservación, partiendo de estas concentraciones máximas, se establecieron cuatro valores más de concentraciones menores.

Se utilizó diesel industrial por su baja viscosidad, lo que le permite migrar verticalmente al suelo, y a diferencia de la gasolina cuyos componentes se ubican en el orden de 12 carbonos o menos, el diesel contiene moléculas de entre 10 y 20 carbonos, es decir su cadena de hidrocarburos es más larga, por lo tanto su degradación es más lenta (HDSS-301 Pemex Diesel, 2011).

Para cada tratamiento se tuvieron siete réplicas. El experimento consistió en colocar en frascos de plástico de 40 ml, 3 g de suelo contaminado con las concentraciones antes mencionadas. En cada frasco se colocó a 20 colémbolos de diferentes estadios de desarrollo seleccionados al azar del cultivo previamente establecido.

Finalmente los frascos de los diferentes tratamientos se colocaron al azar en una charola, misma que se mantuvo dentro de la incubadora de ambiente controlado, para mantener las condiciones de humedad, temperatura y fotoperiodo igual a las del cultivo. Conforme se incrementó el número de organismos por tratamiento, se les alimentó dos veces por semana con 30 microples (10 mg) de levadura de pan (Fig. 4), para evitar la competencia entre ellos o su muerte por inanición.



Figura 4. *O. folsomi* alimentándose de microples de levadura de pan.

Los frascos se revisaron diariamente y se registró el número de individuos sobrevivientes de cada uno de los estadios de desarrollo y el número de huevos nuevos. Esto se realizó durante 6 semanas, con la intención de ver como respondían al tratamiento y al final se estimó el tamaño y la estructura poblacional. Para ello, se tomaron 0.03 g de suelo de cada uno de los frascos sometidos a los diferentes tratamientos y se contabilizó a todos los colémbolos ahí contenidos, con ayuda de un microscopio estereoscópico marca ZEISS modelo Stemi DV4 y se separaron por estadios de desarrollo. Posteriormente con el dato de la cantidad de suelo total contenida en los frascos 3 g, se realizó una estimación del tamaño población hasta ese tiempo en cada uno de los tratamientos.

Para averiguar si existía diferencias de las variables registradas: sobrevivencia, reproducción y fecundidad, entre los tratamientos, los datos fueron analizados con un ANOVA de una vía, y se utilizó el programa PAST (Hammer *et al.*, 2001). Los datos de sobrevivencia que se presentaron en porcentaje fueron transformados con el arcoseno de la raíz cuadrada de la proporción, después se aplicó una prueba Post-hoc (Tukey).

Los datos del número estimado de organismos registrados por tratamiento (Tamaño poblacional) fueron analizados con un modelo lineal generalizado (regresión log lineal, distribución del error tipo Poisson, corregido por sobre dispersión) recomendado para datos de

frecuencias. Finalmente para averiguar si los datos obtenidos de las estructuras poblacionales por tratamiento dependen del tratamiento (diesel) o es independiente del azar se realizó una χ^2 , ambos análisis se hicieron en el paquete JMP versión 7.01.

8. Resultados

8.1 Condiciones óptimas para el desarrollo de *Orthonychiurus folsomi*

Las condiciones óptimas bajo las cuales se desarrolló *O. folsomi*, fue humedad relativa de 100% la cual se logró al mantener los frascos de cultivo cerrados herméticamente, la temperatura promedio fue de $26^{\circ}\text{C} \pm 2$ con un fotoperiodo de 24 h de oscuridad.

8.2 Ciclo de vida

Oviposición. Los huevos tienen una forma esférica, de color transparente y brillante, después del primer día se tornan blanquecinos con forma cúbica, y para el tercer día su coloración ya es amarillenta (Fig. 5).

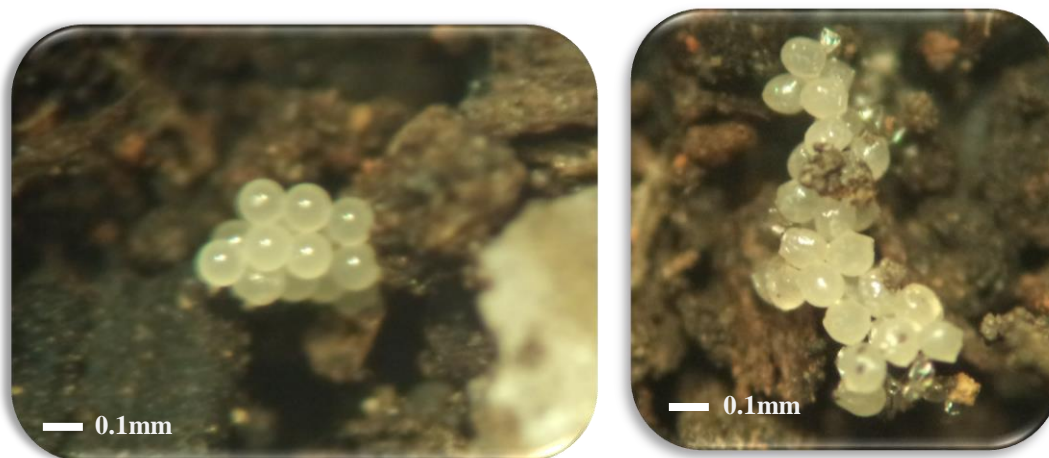


Figura 5. Puesta de huevos de *O. folsomi* al primer (izquierda) y tercer (derecha) día de incubación.

La puesta en promedio fue de 22 (mínimo 20, máximo 25) huevos por hembra. El período de incubación (tiempo entre la oviposición y la eclosión) es de tres días en condiciones óptimas, pero puede variar dependiendo de las condiciones en las que se encuentren. El tamaño de los huevos es de $0.1 \text{ mm} \pm 0.05$, y son depositados en sitios donde se encuentran protegidos, como debajo del mantillo o agujeros dentro del sustrato, además de ser lugares húmedos y oscuros apropiados para su desarrollo.

Eclosión. Los organismos eclosionan al mismo tiempo y este evento duró un par de horas, lo cual depende de la cantidad de huevos que tenga la puesta.

Desarrollo post-embriionario. Los juveniles recién eclosionados presentan un color blanco y no se alimentan del corion al eclosionar, su talla promedio es de $0.28 \text{ mm} \pm 0.004$.

El número de ecdisis antes de que se logre el desarrollo completo (adulto) son cinco, morfológicamente todos los estadios presentan la misma coloración blanquecina y difieren de los adultos en el tamaño, y en el desarrollo de la placa genital (Fig. 6).



Figura 6. Estadios de desarrollo de *O. folsomi*.

El tiempo de eclosión tiene una duración de 3 a 5 días ± 2.19 , de juvenil 1 a 2 y de 2 a 3, dura 4 días ± 0.447 ; de juvenil 3 a 4; de 4 a preadulto 5 días ± 0.334 ; de preadulto a adulto, tarda 6 días ± 0.586 (Fig. 7).

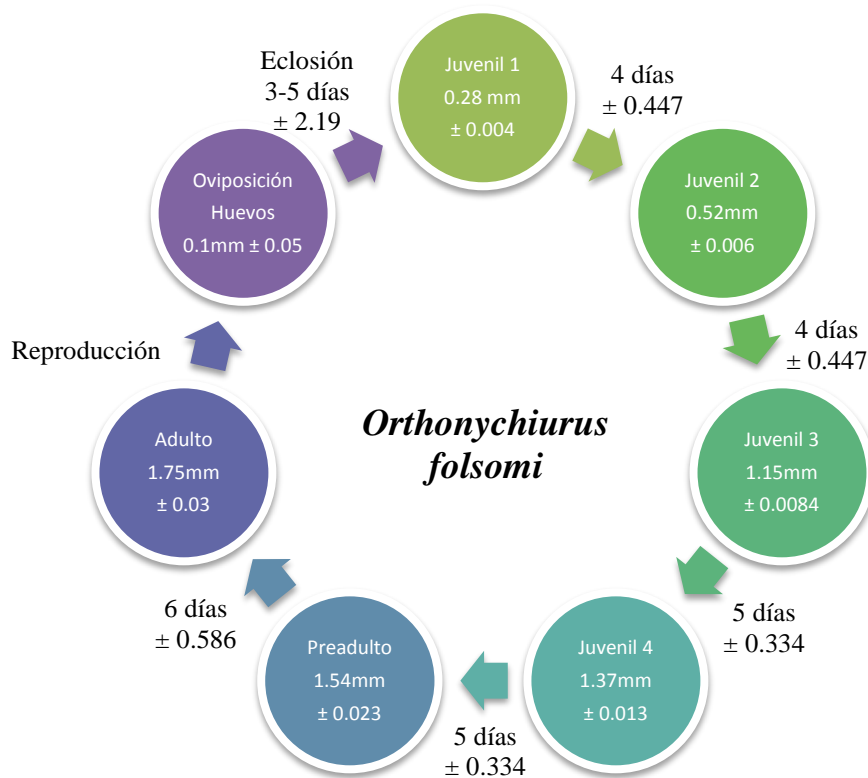


Figura 7. Ciclo de vida de *O. folsomi* en condiciones óptimas, con la talla promedio de cada estadio, así como la duración de cada uno con su respectiva desviación estándar.

Los colémbolos completan su ciclo de vida en aproximadamente cuatro semanas después de su eclosión, aproximadamente de 26 ± 1.36 días.

El dimorfismo sexual no se encuentra marcado en estadios tempranos de desarrollo, es ligeramente evidente en los preadultos y adultos, ya que las hembras presentan el abdomen ligeramente más ancho.

Los colémbolos adultos siguen mudando, y pueden vivir hasta 8 meses en condiciones de laboratorio.

8.3 Supervivencia

Curva de supervivencia

Los datos del número promedio de sobrevivientes de los diferentes estadios de desarrollo tomados de las siete réplicas del tratamiento testigo, se transformaron en logaritmo base 10 (o natural), se graficó el log número promedio de sobrevivientes por estadio de desarrollo y se encontró que la curva de supervivencia para *O. folsomi*, corresponde a una curva tipo I, es decir, la tasa de mortalidad es baja en los primeros estadios de desarrollo, y comienza a aumentar conforme va avanzando la edad de los individuos (Smith y Smith, 2007) (Fig. 8).

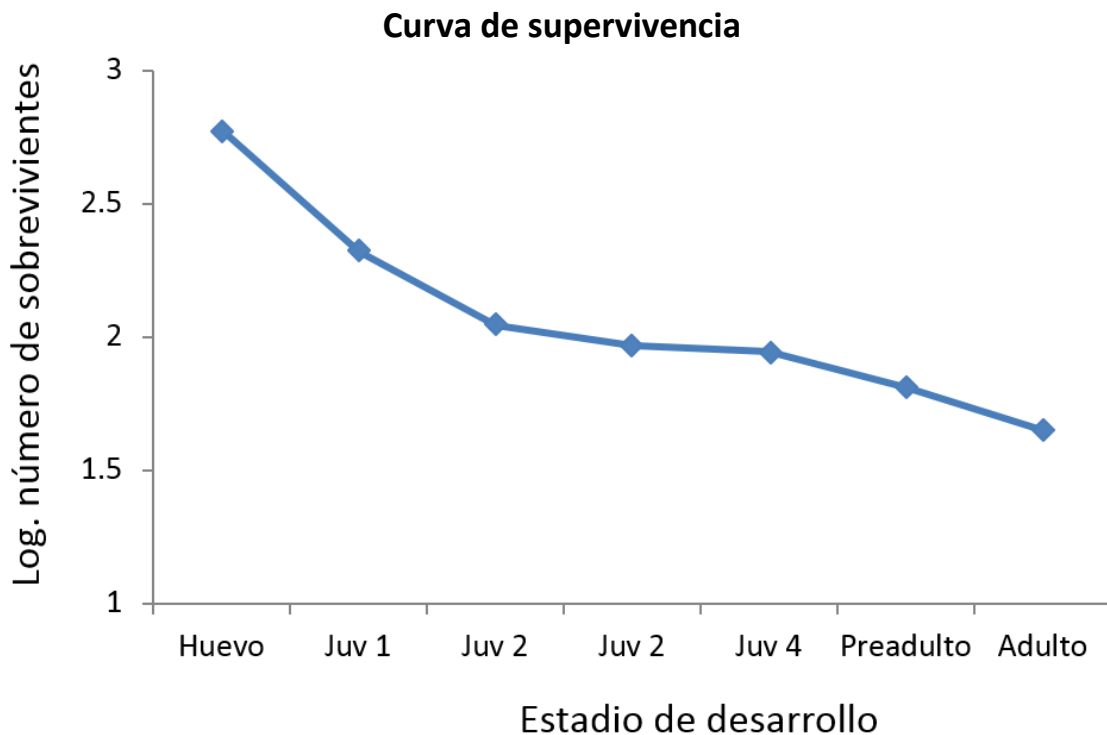


Figura 8. Curva de supervivencia de *O. folsomi* al termino del experimento.

Supervivencia

Según los resultados del análisis de varianza se encontró que si hay un efecto significativo de la concentración de diesel ($F_{(6,42)}=72.71$; $p=0.001$) sobre el número de organismos que sobreviven, ya que los tratamientos con concentraciones de 1000 mg/kg y 2000 mg/kg tienen una menor supervivencia, en comparación con los tratamientos con menor concentración. La supervivencia en concentraciones menores a 500 mg/kg fueron estadísticamente similares a la registrada para el testigo (0 mg/kg) (Fig. 9).

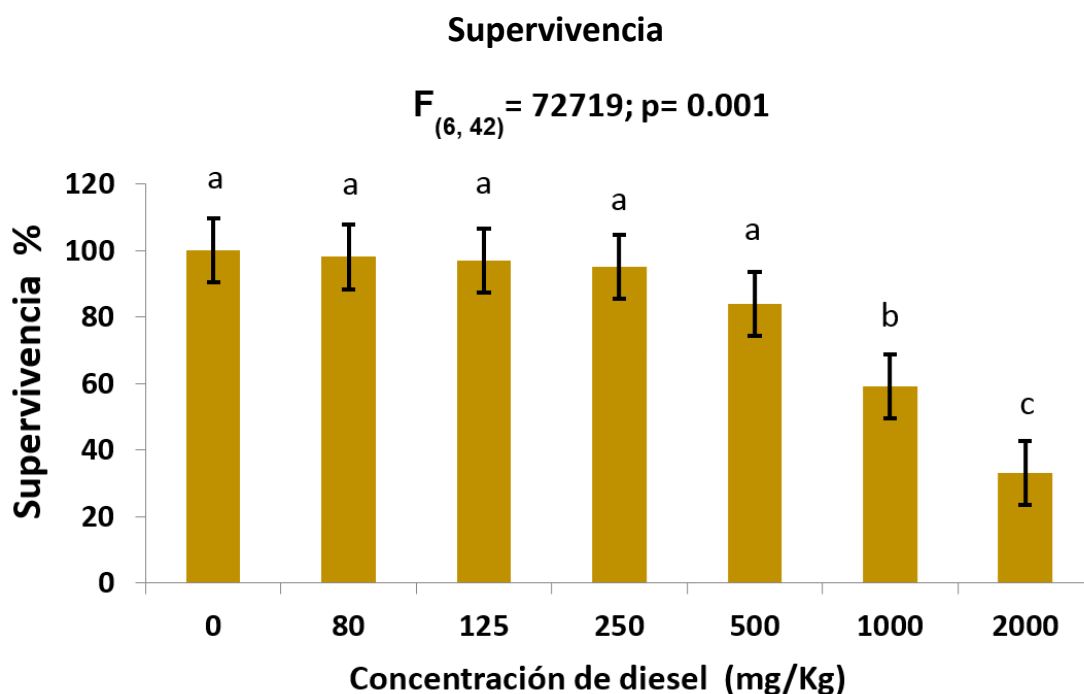


Figura 9. Porcentaje de sobrevivientes de *O. folsomi* en diferentes concentraciones de diesel. Las barras corresponden al error estándar y las letras denotan diferencias significativas con $p < 0.05$ (prueba de Tukey).

8.4 Reproducción

El tiempo promedio que transcurrió desde que se montó el experimento, hasta que se registraron los primeros huevos para las concentraciones bajas de diesel en el suelo (de 0 mg/kg a 250 mg/kg) fue más rápido, en comparación con lo registrado en concentraciones de diesel por arriba de 500 mg/kg (cuadro 2).

Cuadro 2. Tiempo de oviposición durante la primera semana después de montado el experimento.

Tratamiento	Oviposición
Testigo 0 mg/kg	2 días ± 0.3
80 mg/kg	2 días ± 0.3
125 mg/kg	2 días ± 0.4
250 mg/kg	2 días ± 0.4
500 mg/kg	3 días ± 0.64
1000 mg/kg	3 días ± 0.71
2000 mg/kg	5 días ± 0.54

El tiempo de eclosión es otro parámetro que se ve afectado por la concentración de diesel, los organismos en el tratamiento testigo eclosionan significativamente ($F_{(6,42)} = 115.06$; $p=0.001$) más rápido (3 ± 1 día), en comparación con los que se encuentran en la concentración de 2000 mg/kg que eclosionan (17 ± 1 días) (Fig. 10).

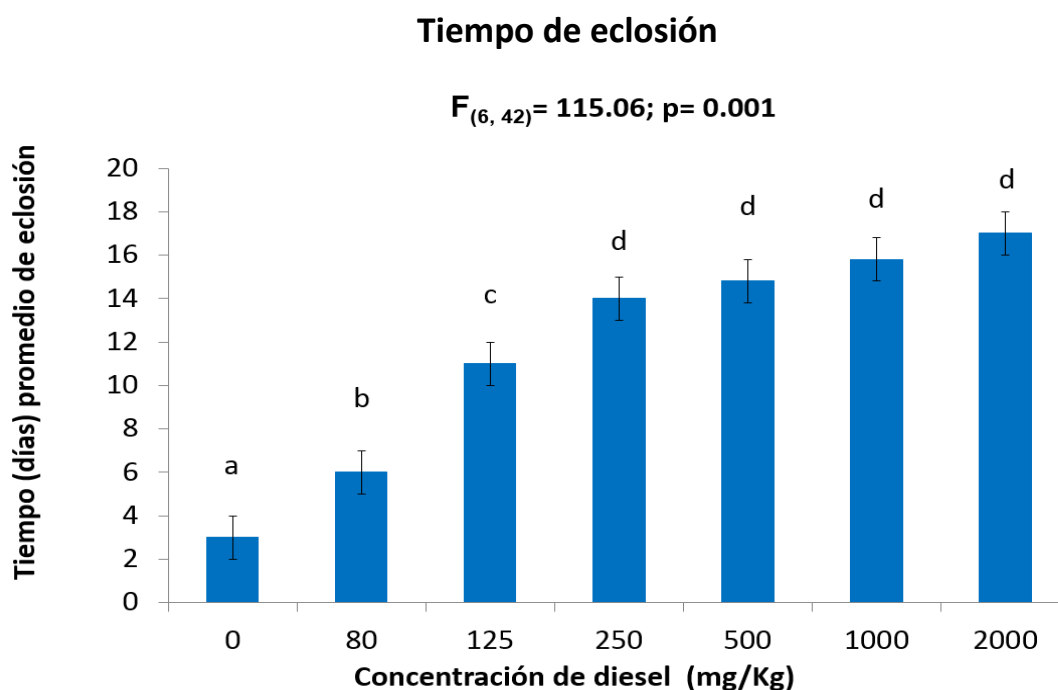


Figura 10. Tiempo promedio de eclosión de *O. folsomi* en las diferentes concentraciones de diesel. Las barras corresponden al error estándar y las letras denotan diferencias significativas con $p < 0.05$ (prueba de Tukey).

8.5 Fecundidad

Sí hay un efecto significativo $F_{(6,42)}=3.608$; $p=0.005$ de la concentración del diesel sobre la fecundidad de *O. folsomi*. Se observó, que conforme aumenta la concentración de diesel, el número de huevos que ovipositan disminuye, encontrándose que el número de huevos registrado en el testigo (0 mg/kg) es significativamente mayor comparado con el número de huevos que se registraron en la concentración de 2000 mg/kg donde fue menor (Fig. 11).

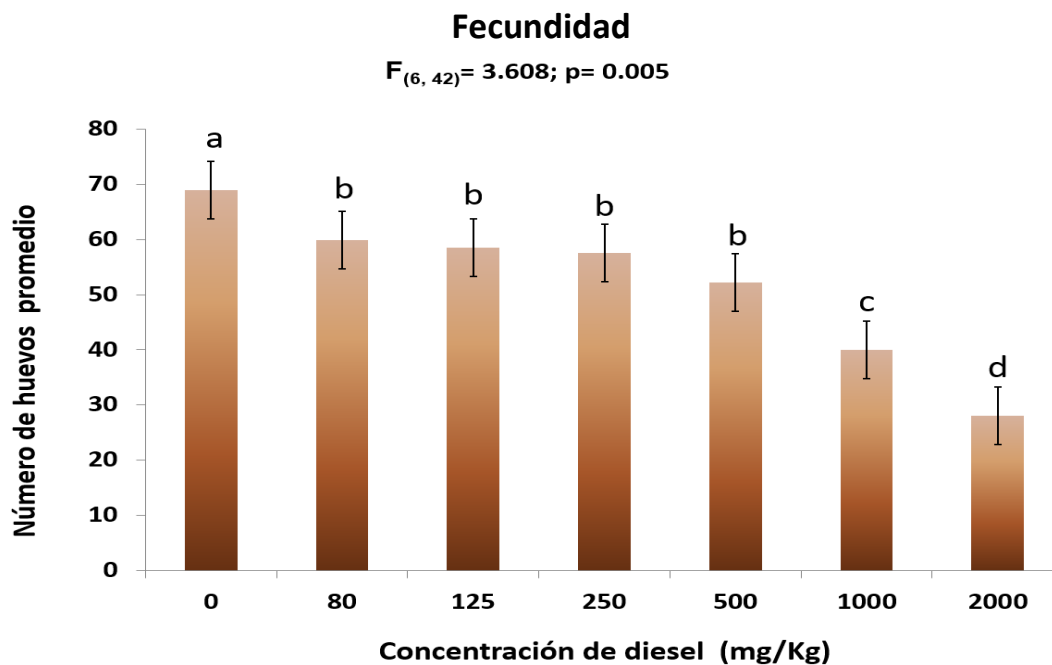


Figura 11. Número de huevos promedio en las diferentes concentraciones de diesel. Las barras corresponden al error estándar y las letras denotan diferencias significativas con $p < 0.05$ (prueba de Tukey).

8.6 Tamaño poblacional

Para el tamaño poblacional (número de individuos) de *O. folsomi* después de 2 meses de haber montado el experimento se encontró que si hay un efecto significativo (Devianza (SQ)= 24512,68; g.l.= 3; $p < 0.000$) de la concentración de diesel sobre el número de individuos de *O. folsomi*. En el tratamiento testigo (0 mg/kg) hay significativamente más organismos (19565 ± 575.83 colémbolos) que lo registrado en el tratamiento de (2000 mg/kg) donde el número de organismos fue (1150 ± 575.83 colémbolos) 6 veces menor que en el testigo (Fig. 12).

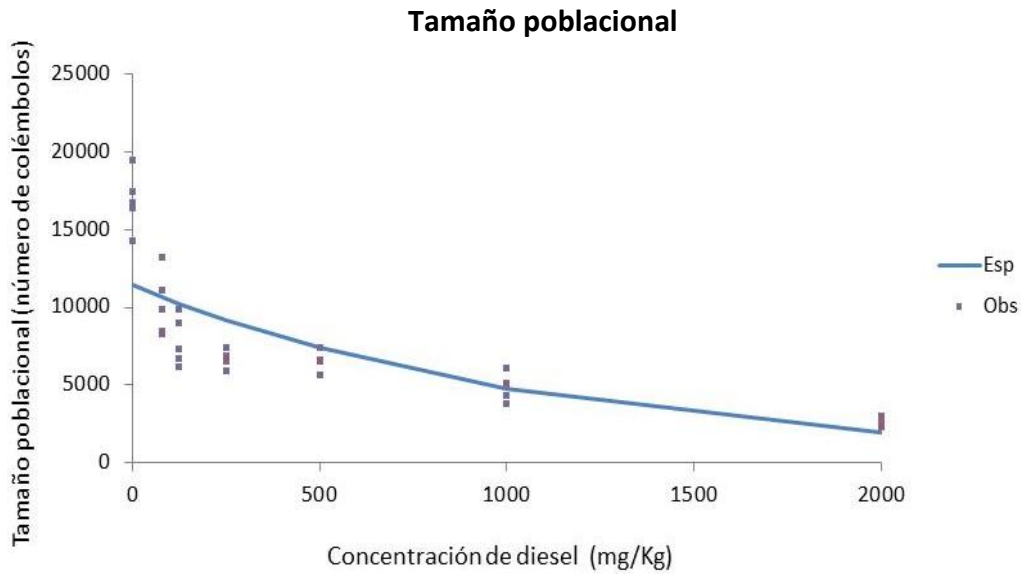


Figura 12. Número de organismos observados y esperados en las diferentes concentraciones de diesel

8.7 Estructura poblacional

Se obtuvo un efecto significativo ($\chi^2=4890.5$; g.l.= 36; $p<0.0001$) de la concentración del diesel sobre la estructura de la población de *O. folsomi*. Los resultados muestran que en todos los tratamientos se registraron organismos de los diferentes estadios de desarrollo. Sin embargo, el número de organismos por estadio varía según el tratamiento, en el testigo (0 mg/kg), los estadios de desarrollo mejor representados fueron los huevecillos, juvenil 1, 2 y 3, mientras que en las concentraciones de 80 mg/kg, 125 mg/kg, 250 mg/kg, 500 mg/kg, 1000 mg/kg y 2000 mg/kg, los estadios mejor representados fueron los juveniles 1, 2 y 3.

Es importante resaltar que la estructura de la población en el tratamiento de 2000 mg/kg, si bien es cierto que se registraron organismos de todas las categorías de tamaño, las abundancias están muy por debajo de lo registrado en el tratamiento testigo, cabe resaltar que teniendo tan pocos registros de juvenil 5 y adultos, el número de huevos es bajo, situación delicada para la población ya que la tasa de reclutamiento es cada vez menos, con altas posibilidades de que la población se colapse en corto tiempo (Fig. 13).

Estructura poblacional

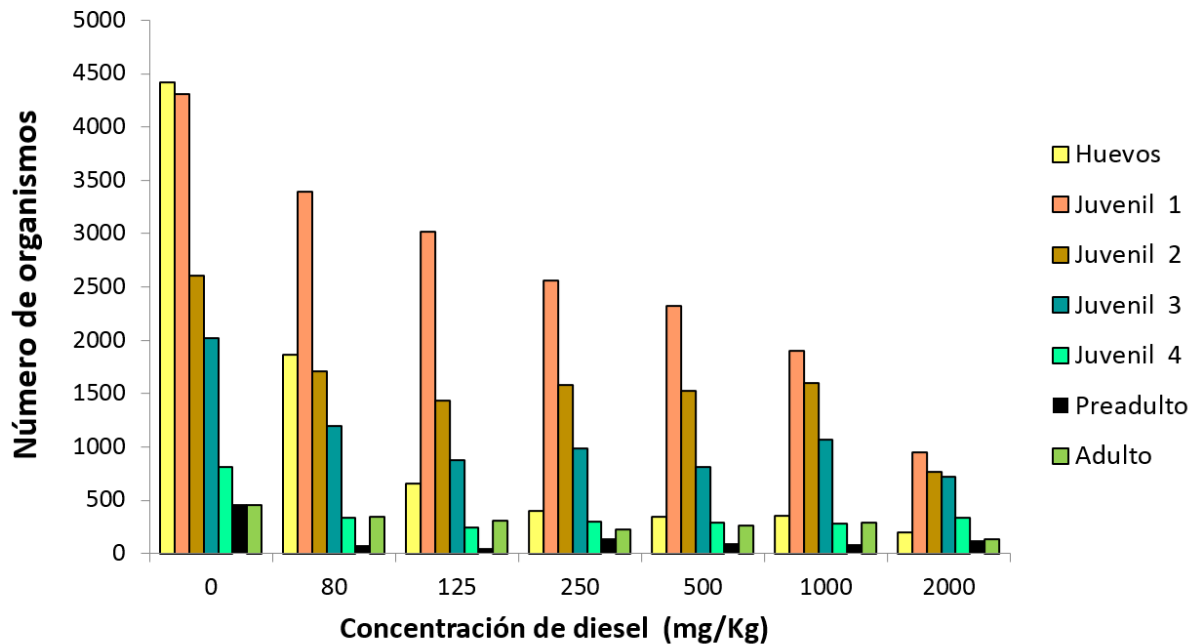


Figura 13. Número de organismos vivos totales por categoría de tamaño de las diferentes concentraciones de diesel.

9. Discusión

De manera general podemos decir que el diesel tienen un efecto negativo en la supervivencia, fecundidad y desarrollo de la población de *O. folsomi*, ya que en concentraciones altas los colémbolos sobreviven menos, ponen pocos huevos y alcanzan tamaños poblacionales pequeños, esto puede deberse a cambios en las condiciones del suelo así como a la posible respuesta de los organismos.

De acuerdo con las condiciones necesarias para que se desarrolle de manera adecuada *O. folsomi*, se determinó que la humedad relativa en el ambiente es fundamental y que debe estar por arriba de 80% ya que esta condición influye directamente sobre la eclosión, el desarrollo y la reproducción de los organismos. Para *O. folsomi* fue de 100%, resultado que coincide con lo reportado por Davies (1928) quien evaluó el efecto de la variación en la humedad relativa de cinco diferentes especies de Collembola (*Sminthurus viridis* Lubb, *Dicyrtomina minuta* Fab., *Entomobrya multifasciata* Linn, *Isotoma viridis* Bourl. y *Tomocerus vulgaris* Tullb) en extremo sensibles a dicha variación, con una temperatura de 25°C, se encontró que la susceptibilidad a la sequía atmosférica (50% < humedad relativa) es mortal en cuestión de minutos, a excepción de *S. viridis*, debido a su sistema traqueal y tubo ventral bien desarrollado. Menciona también que

disminuye la tasa de mortalidad entre el 50 y 90% de humedad relativa, sin embargo la saturación del ambiente al 100% de humedad relativa es vital para la supervivencia de las especies de colémbolos utilizadas en el experimento. Asimismo, Arbea y Jornada (1988) mencionan que en lechos de lombriz *Eisenia andrei*, *O. folsomi* alcanza tamaños poblacionales muy elevados, lo cual se debe a la calidad del alimento disponible en los cultivos, la temperatura y la humedad, condiciones que también favorecen el crecimiento y fecundidad de los colémbolos, quienes alcanzan sus condiciones óptimas de desarrollo a una humedad de 100%.

La temperatura promedio fue de $26^{\circ}\text{C} \pm 2$, ya que ante una disminución o aumento de ésta, se observó una alteración del tiempo de eclosión, entre los 16° a 18°C la eclosión fue de hasta 7 a 10 días y si la temperatura aumentaba de 29° a 31°C los huevos ya no eran viables. Éstos resultados son similares a los obtenidos por Snider (1983) quien realizó un estudio sobre oviposición, eclosión y fecundidad en *O. folsomi*, y encontró que a temperaturas menores a 15°C el tiempo de eclosión se alarga y a temperaturas mayores a 27°C se acorta, no obstante sus resultados acerca de la temperatura óptima en laboratorio difieren con los encontrados aquí, ya que él menciona que ésta fue de 15.5° a 21.2°C , en la cual el tiempo de eclosión fue menor y la viabilidad del huevo fue mayor. En cuanto al tamaño de la masa de huevos menciona una variación entre 15 y 45 huevos a 15°C , y entre 12 y 36 huevos a 21°C , sin embargo, en nuestras condiciones de 26° a 28°C la masa de huevos fue de entre 20 y 22 huevos. Además encontró que en los huevos no viables a temperaturas elevadas ocurría canibalismo, lo cual en este experimento no se logró observar, es atribuible a que siempre tuvieron alimento suficiente. Arbea y Jornada (1988) mencionan que las condiciones óptimas de vida para *O. folsomi* ocurren a bajas temperaturas, aunque no especifican cuales. Esto lo atribuyen a que puede deberse a que el colémbolo encuentra en los lechos de la lombriz condiciones óptimas para su desarrollo, tanto por la saturación de humedad como por la gran disponibilidad de alimento, por lo cual la temperatura en ambientes naturales tal vez no sea un parámetro que afecte significativamente, sin embargo en cultivos de laboratorio sí, ya que dependiendo de la temperatura se puede alargar o acortar el tiempo de oviposición y el desarrollo de los colémbolos.

El fotoperiodo fue de 24 h de oscuridad total, sin embargo Environment Canada (2014) realizaron pruebas para medir la supervivencia y reproducción de colémbolos expuestos a contaminantes del suelo, donde trabajan con *O. folsomi* un fotoperiodo de 16hL:8hO o 12hL:12hO, y Santorufo *et al.* (2011) trabajaron con una especie del mismo género (*O. pseudostachianus*) y mantuvieron cultivos con un fotoperiodo de 16hL:8hO, en pruebas de

toxicidad y selección de una batería de prueba ecotoxicológica para evaluar la calidad del suelo. En todos los trabajos el fotoperiodo utilizado fue diferente, sin embargo no afecto a los cultivos. Al ser *O. folsomi* una especie euedáfica, es decir, que se encuentra en el suelo mineral y es habitante permanente (geobiontes) de los intersticios del suelo (Palacios-Vargas y Mejía-Recamier, 2007) en este experimento se utilizó un fotoperiodo de total oscuridad, lo cual para los cultivos fue favorable.

El ciclo de vida de *O. folsomi* con dichas condiciones tiene una duración de 25 a 27 días, lo cual se aproxima a lo reportado en Environment Canada (2014) para esta especie, donde la duración es de 28 días.

De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio se corrobora que los contaminantes en el suelo como el diesel, afecta negativamente la supervivencia y el desarrollo de *O. folsomi*, resultado que coincide con lo reportado en otros estudios. Se ha encontrado que a mayor concentración de destilados tóxicos de petróleo mayor mortalidad de colémbolos y lombrices, así como menor germinación de plantas (Cermak *et al.*, 2010). Asimismo, otros autores Tang *et al.* (2011) y Hentati *et al.* (2013), reportan que en suelos con alto contenido de hidrocarburos se reduce la supervivencia y crecimiento de poblaciones de lombrices y bacterias luminiscentes, y que después de 14 días para la mortalidad es del 64% de los organismos.

Se sabe que a mayor contaminación de diesel en el suelo cambian algunas de sus propiedades, de acuerdo con lo reportado en la literatura, por ejemplo, disminuye el pH, se reduce la porosidad, aumenta la retención de agua y concentración de elementos como el C, Mg y P, factores que afectan la sobrevivencia y la dinámica de las poblaciones de *O. folsomi*.

En el caso de *O. folsomi*, una posible explicación de la baja sobrevivencia aún y cuando se emplearon concentraciones de diesel menores a lo reportado en otros trabajos (Cermak *et al.*, 2010 y Gospodarek, 2011) pudo estar asociada a factores como:

1) la concentración de volátiles en el medio, los cuales se alojan en los intersticios del suelo y terminan asfixiando a los organismos;

2) la sensibilidad que desarrollan los organismos como resultado de sus hábitos alimenticios, por ejemplo se menciona que una especie detritívora asimila más contaminantes y son más sensibles que las especies herbívoras (Gospodarek, 2011). Algo semejante pudo haber ocurrido con *O. folsomi* ya que durante todo el experimento la levadura de pan estuvo en contacto directo con el contaminante, sin embargo sería conveniente hacer estudios de tolerancia para poder demostrarlo;

3) la ausencia de resistencia de los organismos empleados al contaminante. En trabajos de laboratorio (Gospodarek, 2011), se encontró que el diesel en el suelo en dosis de 10,000 mg/kg no tienen un efecto negativo en comparación con lo que se ocasiona la misma concentración de petróleo, sobre poblaciones de babosas, lo cual se relaciona con la tolerancia de estos organismos a los contaminantes. Distintos autores (Smit y Van Gestel, 1997; Lock y Janssen, 2003; Xu *et al.*, 2009; Santorufo *et al.*, 2012), reportan que a altas concentraciones de zinc, no se observa un efecto sobre la mortalidad de los organismos ya que encontraron que en los colémbolos *Sinella curvisea*, *Folsomia candida*, y *Onychiurus pseudostachianus*, así como en el oligoqueto *Eisenia fetida*, la mortalidad es baja, lo cual atribuyen a la tolerancia que han desarrollado ante cada contaminante, en el caso del Zn, es probable que no mueran muchos organismos debido a que ya se adaptaron a vivir en suelos con esas concentraciones de Zn (Smit y Van Gestel, 1997; Chagnon *et al.*, 2000; Greenslade y Vaughan, 2003; Nursita *et al.*, 2005;). En el caso de *O. folsomi*, la alta mortalidad registrada conforme incrementa la concentración del diesel puede deberse a que los colémbolos provenía de un lugar libre de contaminantes y fueron expuestos al contaminante sin previa aclimatación. Es importante resaltar que los efectos más severos en cuanto a la sobrevivencia y desarrollo de *O. folsomi* se observaron en la primera generación, que son los datos que aquí se presentan, y coinciden con Cermak *et al.*, 2010, sin embargo como el experimento se siguió durante seis meses más, se pudo observar que conforme transcurría el tiempo y el efecto del diesel disminuía, la población de *O. folsomi* se iba recuperando aún en concentraciones altas de diesel (resultados no publicados), lo cual nos indica que es muy importante dejar pasar el tiempo necesario para evaluar el efecto de la prueba y determinar con seguridad la toxicidad del contaminante.

4) Otro factor al que se atribuye un efecto negativo de los contaminantes en la sobrevivencia y desarrollo de los organismo edáficos, se relaciona con una disminución de O₂ en el suelo, se ha documentado, que a altas concentraciones de diesel, se inhibe la respiración de los microorganismos edáficos y como consecuencia hay una disminución en las poblaciones de estos (Siddqui *et al.*, 2001). En el mismo sentido, se ha encontrado que los contaminantes pueden tener efectos indirectos, que dependen de factores como la competencia, las condiciones climáticas y la disponibilidad de alimento. En *Folsomia fimentaria* (Bruus Pedersen y Van Gestel, 2001) reportan que a mayor concentración de cobre hay una alteración en la disponibilidad del alimento, más que un efecto directo sobre la reproducción o la sobrevivencia de los organismos.

5) El hecho de que la supervivencia de *O. folsomi* en concentraciones hasta de 500 mg/kg no difirieran estadísticamente de lo registrado para el testigo, pudo deberse a la conducta de los organismos y/o a la capa cerosa que cubre su cuerpo, la cual actúa como barrera. En este estudio se observó que en concentraciones de 1000 mg/kg y 2000 mg/kg la movilidad de los organismos disminuía considerablemente poco tiempo después de que entraron en contacto con el suelo contaminado, mientras que en concentraciones por debajo de 500 mg/kg los colémbolos siempre se mantuvieron muy activos aunque el tiempo de oviposición y desarrollo de los organismo fue menor que lo registrado en concentraciones mayores a 250 mg/kg. Este resultado coincide con lo reportado por otros autores (Siddqui *et al.*, 2001), quienes encontraron que en bajas concentraciones de naftaleno, antraceno, pireno liberadas en el aire, *Folsomia candida* podía moverse libremente y su capa cerosa lo protegía, pero cuando las concentraciones aumentaban se estimulan procesos espontáneos de bioasimilación de los tóxicos, de tal manera que la movilidad disminuía y aumentaba la mortalidad de colémbolo.

El valor que indica la Norma Oficial Mexicana como permisible para uso de suelos de uso agrícola, forestal, recreativo, de conservación, y para uso de suelo residencial comercial es de 1,000 mg/kg de HTP, mientras que el límite para el uso de suelo industrial es de 2,000 mg/kg, para HTP, lo que es congruente con los resultados obtenidos en la supervivencia, ya que en concentraciones de 1000 mg/kg y mayores, disminuye significativamente, sin embargo no así son adecuados para otros parámetros como la reproducción, fecundidad y desarrollo de la población, los cuales se ven afectados en concentraciones menores (80 mg/kg, 125 mg/kg, 250 mg/kg y 500 mg/kg) de diesel, quizá la Norma Oficial Mexicana pudiese modificarse en el sentido de afectación a dichos parámetros.

Es importante mencionar que la mayoría de los trabajos relacionados con este tema, solo evalúan el efecto del contaminante sobre la supervivencia de los organismos, sin averiguar cómo se afectan otros parámetros poblaciones a largo plazo, de tal forma que podamos tener una idea del destino de cada especie en suelos contaminados. Diversos autores (Crommentuijn *et al.*, 1997; Søvik *et al.*, 2003; Catalán 2016) han documentado para otras poblaciones de hexápodos, que sí hay una reducción en la supervivencia, y además se pueden ver afectados parámetros de historia de vida como: el tiempo que tardan para alcanzar la edad reproductiva, la fecundidad y el tiempo de desarrollo, lo que finalmente se ve reflejado en un tamaño poblacional pequeño. Lo mismo, se encontró para la población de *O. folsomi*, en suelos contaminados con dosis superiores a 1000 mg/kg de diesel, ya que se reduce significativamente la sobrevivencia, incrementa el tiempo que

les lleva a los organismos empezar a reproducirse y si a esto le agregamos que ponen pocos huevos, tenemos como resultado un tamaño poblacional significativamente menor en comparación con poblaciones que se desarrollan en suelos libres de contaminantes. Asimismo, su estructura poblacional se ve fuertemente afectada, al tener muy bajas abundancias de los colémbolos en todas sus etapas de desarrollo, resultados que a corto plazo podría llevar a la extinción local de algunas especies. Lo que tendría como consecuencia un efecto negativo directo sobre el funcionamiento del sistema, porque habría una tasa de descomposición de materia orgánica baja, una recuperación lenta de la fertilidad del suelo y un retraso en la formación del mismo, situación poco favorable para los sistemas ya que el suelo es un recurso esencial para el desarrollo de otros organismos.

10. Conclusiones

Bajo condiciones de $26^{\circ}\text{C} \pm 2$ de temperatura, 100% de HR y total obscuridad, *O. folsomi* completa su ciclo de vida en 26 ± 1.36 días después de la eclosión y pasan por cinco estadios de desarrollo antes de ser adultos, estas condiciones influyen directamente sobre la eclosión, el desarrollo y la reproducción de los organismos.

En concentraciones de 1000 mg/kg de diesel industrial y mayores, la supervivencia disminuye significativamente, y en concentraciones mayores de 500 mg/kg se afectan negativamente la reproducción, desarrollo y tamaño de la población de *O. folsomi*, en condiciones de laboratorio.

O. folsomi al ser una especie cosmopolita con amplia distribución en el centro y norte de América, al ser geobionte, es decir, que pasa todo su ciclo de vida dentro del suelo, es muy abundante en los sitios donde se encuentra y es detritívora, además de tener un ciclo de vida corto, una tasa de reproducción alta, funge como candidata a considerarse como un indicador ecológico (bioindicador) del estado de alteración ambiental de sitios contaminados, particularmente con hidrocarburos, recordando que las comunidades de colémbolos que habitan los suelos se ven altamente afectadas por variaciones de pH, estructura del suelo, composición de materia orgánica, disponibilidad de nutrientes, entre otros.

Para conocer si *O. folsomi* se encuentra vinculada con la recuperación del suelo contaminado con hidrocarburos y pudiese ser candidata como un elemento importante para su biorremediación, se deben hacer pruebas exhaustivas donde se observe que son capaces de llevar a cabo todas sus funciones vitales aún bajo estas condiciones adversas y si esto se debe a la

capacidad de bioacumular en sus cutículas algunas sustancias o que los productos de su metabolismo modifiquen sus condiciones, al permitir la agregación de partículas, de manera que se compruebe que no son afectadas por los HAP, considerando que también intervienen factores como la volatilización de los hidrocarburos y no precisamente la intervención de los colémbolos.

Otro aspecto que sería muy importante estudiar es sobre la etología que tienen los organismos al entrar en contacto con la contaminación por hidrocarburos ya que no ha sido estudiada y aún se desconoce su afectación a nivel fisiológico,

Literatura citada

- Adams, R.H., V.I. Domínguez y L. García. 1999. Potencial de la biorremediación de suelo y agua impactados por el petróleo en el trópico mexicano. *Terra*, 17(2):159-174.
- Agbogidi, O.M., P.G. Eruotor y S.O. Akparabi. 2007. Effects of Time of Application of Crude Oil to Soil on the Growth of Maize (*Zea mays* L.). *Research Journal of Environmental Toxicology*, 1(3):116-123.
- Aguilera, N. 1989. Tratado de edafología de México. Tomo 1. Facultad de Ciencias, UNAM, México. Pp:54-76.
- Arbea, J.I. y R. Jornada. 1988. Nota sobre la presencia masiva de *Onychiurus folsomi* SHAEFFER (Collembola, Onychiuridae) en lechos de *Eisenia andrei* (Oligochaeta, Lumbricidae). *Boletín de Sanidad Vegetal. Plagas*, 14(4):535-540.
- Barajas, G. 1996. La influencia de la meso y macrofauna en la descomposición de la fracción foliar del mantillo de especies arbóreas en una selva húmeda tropical. Tesis Maestría, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México. 102 pp.
- Battigelli, J.P. y V.G. Marshall. 1993. Relationships between soil fauna and soil pollutants. *In Proceedings of the forest ecosystem dynamics workshop*. Victoria, B.C. Pp:31-34.
- Bellinger, P.F., K.A. Christiansen y F. Janssens. 1996-2017. Checklist of the Collembola of the world. <http://www.collembola.org>.
- Bruus Pedersen, M. y C.A.M. Van Gestel. 2001. Toxicity of copper to the collembola *Folsomia fimetaria* in relation to the age of soil contamination. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 49(1):54-59.
- Butcher, J.W., R. Zinder y R. Snider. 1971. Bioecology of edaphic Collembola and Acarina. Department of Entomology, Michigan State University, East Lansing. Pp:249-288.

- Catalán, J.E. 2016. Efecto de la competencia interespecífica sobre algunos caracteres de historias de vida de *Ceratophysella denticulata* (Collembola: Hypogastruridae) de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. Tesis Maestría, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México. 47pp.
- Cermak, J.H., G.L. Stephenson, D. Birkholz, Z. Wang y D.G. Dixon. 2010. Toxicity of petroleum hydrocarbon distillates to soil organisms. *Environmental Toxicology Chemistry*, 29:2685-2694.
- Chagnon, M., C. Hébert y D. Paré. 2000. Community structures of Collembola in sugar maple forests: relations to humus type and seasonal trends. *Pedobiologia*, 44:148-174.
- Christiansen, K.A. 1992. Springtails. *The Kansas School Naturalist*, 39(1):1-16.
- Cotler, H., E. Sotelo. J. Domínguez, M. Zorrilla, S. Cortina y L. Quiñones. 2007. La conservación de suelos: un asunto de interés público. *Gaceta Ecológica*, 83:5-71.
- Crommentuijn, T., C.J.A.M. Doodeman, A. Doornekamp, C.A.M. Van Gestel. 1997. Life-table study with the springtail *Folsomia candida* (Willem) exposed to cadmium, chlorpyrifos and triphenyltinhydroxide. *Ecological Risk Assessment of Contaminants in Soil*, 275-291.
- Cutz-Pool, L.Q., J.G. Palacios-Vargas, G. Castaño-Meneses y N.E. García-Calderón. 2007. Edaphic Collembola from two agroecosystems with contrasting irrigation type in Hidalgo State, Mexico. *Applied Soil & Ecology*, 36:46-52.
- Davies, W.M. 1928. The effect of Variation in Relative Humidity on Certain Species of Collembola. *Journal of Experimental Biology*, 6:79-86.
- Delgado, E. 2010. Distribución geográfica de *Collembola* (Hexapoda: Collembola) en México. Tesis Licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. México. 161pp.
- Elías-Murguía, R.L. y V. Martínez. 1991. Suelos contaminados con hidrocarburos. *In*: Ruiz, F. J. F. (ed.). *Causas y Consecuencias de la Contaminación del Suelo*. Mesa Redonda, Departamento de Suelos. UACH, Chapingo, México. Pp:46-53.
- Environment Canada. 2014. Biological Test Method: Test for measuring survival and reproduction of springtails exposed to contaminants in soil. Report EPS 1/RM/47. Second edition. Environment Canada Ottawa. Canada. 184p.
- Etuk Etiese Akpan, C. Ogboi Kingsley, y C.A Nwadinigwe. 2013. Bioremediation of Hydrocarbon Polluted Soil in the Lowland Forest Ecosystem in the Niger Delta through

- Enhanced Natural Attenuation Process (ENAP). *International Journal of Applied Science and Technology*, 3(8):128-137.
- Fassbender, H.W. 1975. *Química de Suelos con énfasis en suelos de América Latina*. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA. Turrialba, Costa Rica. Pp:7-15.
- Frampton, G. K. 1997. The potencial of Collembola as indicators of pesticide usage: evidence and methods from the UK arable ecosystem. *Pedobiologia*, 41:179-184.
- Flores, M.A., S. Torres y R. Téllez. 2004. Medidas de mitigación para uso de suelos contaminados por derrames de hidrocarburos en infraestructura de transporte terrestres. *Publicación técnica*, 257:2-72.
- Gospodarek, J. 2011. Effect of soil contamination whit petrol, diesel oil and engine oil on survival rate of Arionidae representatives under laboratory conditions. *Proceedings of ECOpole*, 5(1):47-50.
- Greenslade, P. y G.T. Vaughan. 2003. A comparison of Collembola species for toxicity testing of Australian soils. *Pedobiologia*, 47:171-179.
- Hammer, Ø., D.A.T. Harper, P.D. Ryan. 2001. PAST: Paleontological statistics soft-ware package for education and data analysis. *Paleontología Electrónica* 4.9.
- HDSS-301 Pemex Diesel, 2011.<http://www.pemex.com/>
- Hentati, O., R. Lachhab, M. Ayadi y M. Ksibi. 2013 Toxicity assessment for petroleum-contaminated soil using terrestrial invertebrates and plant bioassays. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185:2989-2998.
- Hopkin, S.P., C.A. Hames, y A. Dray. 1989. X-ray microanalytical mapping of the intracelular distribution of pollutant metals. *Microscopy and Analysis*, 14:23-27.
- Hopkin, S. 1997. *Biology of the springtails (Insecta: Collembola)*. Oxford University Press, Oxford. 330p.
- Hopkin, S. 2002. Collembola. *Encyclopedia of Soil Science*. Pp:207-210.
- Jordán, A. 2005. *Manual de Edafología*. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola. Universidad de Sevilla. España. 143p.
- Jordana, R., J.I. Arbea, C. Simón y M.J. Lucíañez. 1997. Collembola, Poduromorpha. *In*. *Fauna Ibérica*, vol. 8, Ramos, M.A. et al. (Eds). *Musea Nacional de Ciencias Naturales*. CSIC. Madrid. Pp:12-28.
- Kopeszki, H. 1997. An active bioindication method for the diagnosis of soil properties using Collembola. *Pedobiologia*, 41:159-166.

- LEGEEPA, 1987. Ley General de Equilibrio Ecológico y de Protección al Ambiente. Diario Oficial de la Federación el 28 de enero de 1988. Título primero, Capítulo primero, Artículo tercero.
- Libro Blanco. 2012. Construcción del proyecto SUSTENTA, Bioparque Urbano San Antonio.
- Lock, K. y C.R. Janssen. 2003. Comparative toxicity of a zinc salt, zinc powder and zinc oxide to *Eisenia fétida*, *Enchytraeus albidus* and *Folsomia candida*. *Chemosphere*, 53(8):851-856.
- Newell, K. 1984. Interaction between two decomposer basidiomycetes and a collembolan under sitka spruce: Distribution, abundance and selective grazing. *Soil Biology and Biochemistry*, 16:227-234.
- NOM-EM-138-ECOL-2002. Norma Oficial Mexicana de Emergencia que establece los límites máximos permisibles de contaminación en suelos afectados por hidrocarburos, la caracterización del sitio y procedimientos para la restauración. Diario Oficial de la Federación, martes 20 de agosto de 2002. Pp:43-53.
- Nota, B., R. Vooijs, N.M. van Straalen y D. Roelofs. 2011. Expression of *mtc* in *Folsomia candida* indicative of metal pollution in soil. *Environmental Pollution*, 159:1343-1347.
- Nursita, A.I., B. Singh y E. Lees. 2005. The effects of cadmium, copper, lead, and zinc on the growth and reproduction of *Proisotoma minuta* Tullberg (Collembola). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 60:306-314.
- Ojeda-Morales, M.E. 2003. Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos derivados del petróleo a través de microorganismos. *Tecnociencia Universitaria*, 2(4):58-63.
- Orellana, J.A. de, M.A. Pilatti. 1994. La estabilidad de agregados como indicador edáfico de sostenibilidad. *Ciencia del suelo*, 12:75-80.
- Ortíz, O., I. Ize, y A. Gavilán. 2003. La restauración de suelos contaminados con hidrocarburos en México. *Gaceta ecológica*, 69:83-92.
- Palacios-Vargas, J. G. 1981. Collembola asociados a *Tillandsia* (Bromeliaceae) en el derrame lávico del Chichinautzin, Morelos, México. *Southwestern*, 6(2):87-98.
- Palacios-Vargas, J.G., y M.L. Castillo. 1992. Sucesión ecológica de microartrópodos dentro de troncos en descomposición. *Boletín de la Sociedad Mexicana de Entomología*, 11:23-30.

- Palacios-Vargas, J.G. y J.A. Gómez-Anaya. 1993. Los Collembola (Hexapoda: Apterygota) de Chamela, Jalisco, México (Distribución ecológica y claves). *Folia Entomológica Mexicana*, 89:1-34.
- Palacios-Vargas, J.G. y M.V. Vidal-Acosta. 1994. Nuevas especies de *Friesea* (Collembola: Neanuridae) de reservas biológicas de México. *South-western Entomologist*, 19:291-299.
- Palacios-Vargas, J.G., y J.M. Thibaud. 1998. Two new Mexican Isotogastrura (Collembola: Isotogastruridae). *The Canadian Entomologist*, 130:195-199.
- Palacios-Vargas, J.G., G. Castaño–Meneses y B.E. Mejía–Recamier. 2000. Collembola. *In* Biodiversidad, taxonomía y biogeografía de artrópodos de México: hacia una síntesis de su conocimiento, vol. II, J.E. Llorente, E. González y N. Papavero (eds.). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F. Pp:249–273.
- Palacios-Vargas, J. G. 2003. Los microartrópodos (Collembola) de la selva tropical húmeda. *In* Ecología del suelo en la selva tropical húmeda de México, J. Álvarez-Sánchez y E. Naranjo-García (eds.). Universidad Nacional Autónoma de México e Instituto de Ecología, A.C., México. Pp:217-225.
- Palacios-Vargas, J.G. y B.E. Mejía–Recamier. 2007. Técnicas de colecta, montaje y preservación de microartrópodos edáficos. Las prensas de ciencias. Facultad de Ciencias, UNAM. 74pp.
- Palacios-Vargas, J.G. y G. Castaño-Meneses. 2014. Los colémbolos (Arthropoda: Hexapoda) como bioindicadores. *In*. Bioindicadores: guardianes de nuestro futuro ambiental, C.A. González, A. Vallarino, J.C. Pérez y A.M. Low (eds). El Colegio de la Frontera Sur e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, México. Pp:291-307.
- Palacios-Vargas, J.G. 2016. Insectos cola de resorte (Collembola). *In*. La biodiversidad en la Ciudad de México, vol. II. CONABIO/SEDEMA, México. Pp:249-258.
- Palma-López, D.J., J. Cisneros, N.A. Trujillo, O.N. Granados y B.E. Serrano. 1985. Caracterización de los suelos de Tabasco: uso actual, potencial y taxonomía. Secretaría de Educación, Cultura y Recreación. Gobierno del estado de Tabasco. Dirección de Educación Superior e Investigación Científica, Departamento de Educación Superior. 40p.

- Petersen, H. y M. Luxton. 1982. A comparative analysis of soil fauna populations and their role in decomposition processes. *Oikos*, 39:287-288.
- Petersen, H. 1994. A review of collembola ecology in ecosystem context. *Acta Zoologica Fennica*, 195:111-18.
- Pomorski, R.J. 2005. (in litt). Onychiurinae, key to the genera.
- Ponge, J.F. 1980. Les biocénoses des Collemboles de la forêt de Sénart. P. Pesson. *Actualités d'écologie forestière*. Pp:151-176.
- PROGRAMA Delegacional de Desarrollo Urbano de Álvaro Obregón, 1997. Pp:7-9.
- Rodríguez, A. 1997. Diseño y evaluación de los métodos físicos y de biorremediación aplicables a las áreas afectadas por las actividades de exploración y producción petrolera en los campos Sánchez Magallanes, Cinco Presidentes, San Ramón, Ogarrío, y La Venta en el Distrito de Agua Dulce, Región sur. PEMEX Exploración y Producción, Contrato No. CORS-S244/94. Villahermosa, Tabasco.
- Rusek, J. 1998. Biodiversity of Collembola and their functional role in the ecosystem. *Biodiversity and Conservation*, 7:1207-1219.
- Rzedowski, G.C. de, J. Rzedowski. 2005. Flora fanerogámica del Valle de México. 2ª ed., 1ª reimp. Instituto de Ecología, A.C. y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Pátzcuaro, Michoacán. 1406 pp.
- Santorufó, L., R. Carotenuto, A. Rocco, F.D.L. Picione y G. Maisto. 2011. *Orthonychiurus pseudostachianus* (Collembola) as a toxicity test organism and selection of an ecotoxicological test battery to assess soil quality. *Applied Soil Ecology*. 54:49-54.
- Saval, S. 1995. Acciones para la remediación de suelos en México. Segundo Mini simposio Internacional sobre Contaminantes del Agua y Suelo. Instituto de Ingeniería. UNAM. México.
- Saval, S. 1998. Situación actual y perspectivas de la Biorremediación de suelos y acuíferos de México. *BioTecnología*, 3:71-76.
- Saval, S. 1999. Éxitos y fracasos de la remediación de los suelos. *In*. Conservación y restauración de suelos. UNAM, PUMA, SEMARNAT. C. Siebe *et al.* (eds.). Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Pp.511-526.
- Siebe, C., R. Jahn y K. Starr. 1996. Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. Serie de Publicaciones Especiales de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. 4:57.

- Smit, C.E. y C.A.M. Van Gestel. 1998. Effects of soil type, pre percolation, and again gon bioaccumulation and toxicity of zinc for the springtail *Folsomia candida*. *Environmental Toxicology Chemistry*, 17:1132-1141.
- Smith, T.M. y R.L. Smith. 2007. *Ecología*. 6ª ed., Pearson Educación, S.A. Madrid, Pp:223-227.
- Snider, R.J. 1983. Observations on the oviposition, egg development and fecundity of *Onychiurus* (*Onychiurus*) *folsomi* at constant temperature. *Pedobiologia*, 25:241–252.
- Søvik, G., H.P. Leinaas, R.A. Ims y T. Solhøyc. 2003. Population dynamics and life history of the oribatid mite *Ameronothrus lineatus* (Acari, Oribatida) on the high arctic archipelago of Svalbard. *Pedobiologia*, 47:257-271.
- Tang, J., M. Wang, F. Wang, Q. Sun y Q. Zhou. 2011. Eco-toxicity of petroleum hydrocarbon contaminated soil. *Journal of Environmental Sciences*, 23(5):845–851.
- Uribe-Hernández, R., C.H. Juárez-Méndez, M.A. Montes de Oca, J.G. Palacios-Vargas, L. Cutz-Pool y B.E. Mejía-Recamier. 2010. Colémbolos (Hexapoda) como bioindicadores de la calidad de suelos contaminados con hidrocarburos en el sureste de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 81:153-162.
- Wokocha, G.A., D. Emeodu y S. Ihenko. 2011. Impact of Crude Oil Spillage on Soil and Food Production in Rivers State, Nigeria. *Journal of Money, Investment and Banking*, ISSN 1450-288X Issue 19.
- Xu, J., X. Ke, P.H. Krogh, Y. Wang, Y.M. Luo y J. Song. 2009. Evaluation of growth and reproduction as indicators of soil metal toxicity to the Collembolan, *Sinella curviseta*. *Insect Science*, 16:57-63.