



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**DISTRIBUCIÓN Y COMPOSICIÓN DE LA MACROFAUNA
Y MESOFAUNA EDÁFICA DEL BOSQUE DE OYAMEL EN
LA CUENCA DEL RÍO MAGDALENA, D.F. MÉXICO.**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO
DE:**

BIÓLOGA

P R E S E N T A :

MÓNICA MARTÍNEZ HURTADO



**DIRECTOR DE TESIS:
DR. JAVIER ÁLVAREZ SÁNCHEZ**

2014



Universidad Nacional
Autónoma de México



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 del Jurado

1. Datos del alumno

Apellido paterno

Apellido materno

Nombre(s)

Teléfono

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Carrera

Número de cuenta

1. Datos del alumno

Martínez

Hurtado

Mónica

55 35 33 78 23

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Biología

406098168

2. Datos del tutor

Grado

Nombre(s)

Apellido paterno

Apellido materno

2. Datos del tutor

Dr.

Francisco Javier

Alvarez

Sánchez

3. Datos del sinodal 1

Grado

Nombre(s)

Apellido paterno

Apellido materno

3. Datos del sinodal 1

Dra.

Alicia

Callejas

Chavero

4. Datos del sinodal 2

Grado

Nombre(s)

Apellido paterno

Apellido materno

4. Datos del sinodal 2

Dr.

Ignacio Mauro

Vázquez

Rojas

5. Datos del sinodal 3

Grado

Nombre(s)

Apellido paterno

Apellido materno

5. Datos del sinodal 3

Dr.

Carlos Enrique

Fragoso

González

6. Datos del sinodal 4

Grado

Nombre(s)

Apellido paterno

Apellido materno

6. Datos del sinodal 4

M. en C.

Arturo

García

Gómez

7. Datos del trabajo escrito.

Título

Número de páginas

Año

7. Datos del trabajo escrito

Distribución y composición de la
macrofauna y mesofauna edáfica del bosque
de Oyamel en la cuenca del Río Magdalena,
D.F. México

82 p

2014

AGRADECIMIENTOS

Al Macroproyecto “Manejo de Ecosistemas y Desarrollo Humano” (SEDEI-PTIP-02) en la Cuenca del Río Magdalena, por el apoyo otorgado para la realización de este proyecto.

Al Laboratorio de Ecología del Suelo por permitirme usar sus instalaciones y a la M. en C. Beatriz Zúñiga Ruiz por su apoyo en el uso del Taller de Ecología y Recursos Naturales, Tlahuizcalpan de la Facultad de Ciencias de la UNAM.

Al Dr. Francisco Javier Álvarez Sánchez por su dirección y paciencia.

A la Dra. Guadalupe Barajas Guzmán por el apoyo en la planeación y resolución de este trabajo.

A la Dra. Irene Sánchez Gallen por su orientación a lo largo de este proceso.

A la Dra. Silvia Castillo Agüero por su asesoría en los métodos Multivariados.

A los revisores de este trabajo por enriquecerlo con sus comentarios: Dra. Alicia Callejas Chavero, al Dr. Ignacio Mauro Vázquez Rojas, al Dr. Carlos Enrique Fragoso González, y al M. en C. Arturo García Gómez que también me asesoró en la identificación de algunos organismos.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

Gracias a tod@s los que me ayudaron en el trabajo de campo Adrián, Liz, Ernesto, Juan Carlos, Elizabeth, Adriana, Dulce y Esthela.

A tod@s los que han pasado por el Laboratorio de Ecología del Suelo, sus alrededores y me apoyaron; Esthela, Kurt, Ernesto, Diego, Gabriela, Yuriana.

A mis amig@s de toda la carrera Adrián, Minerva, Arturo, Óscar y Melba. A mis compañer@s de la Facultad Andrea, Vanessa, Isaura, Hugo, Eunice, Alejandra... A Omar, Ana Victoria, a todos mis amig@s que comprenderán mi temor a enlistarles y no olvidaré.

A mis amig@s de la familia Ornelas Muñiz: a la Sra. Maga, Sra. Margarita, Dr. Gregorio, Diego y David.

A la Dra. Asunción, Manuela, Checo y Mago, por su especial solidaridad.

A mis tí@s y a la familia que desde la distancia siempre me animó.

Y muchas para Adrián que me ha acompañado siempre y me ha apoyado en todas.

DEDICATORIAS

Sobre todo a mi Mamá y a mi Papá, mis maestros de toda la vida.

A Mis Meros Meros Hermanos:

A Juan por torcerme y encaminarme en los senderos de la ciencia.

A Mariana porque siempre será mi par.

A Pepe por su exceso de bromas.

A Lulú que siempre me recuerda a donde voy.

A la vida.

A mí.



CONTENIDO

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1 Clasificación de la fauna.....	3
1.2 Función de la fauna edáfica en el ecosistema.....	5
1.2.1 Microfauna	7
1.2.2 Mesofauna	7
1.2.3 Macrofauna.....	8
1.3 Distribución de la fauna.....	12
2. ANTECEDENTES	13
3. JUSTIFICACIÓN.....	17
4. OBJETIVOS	17
5. HIPÓTESIS	18
6. MÉTODOS	19
6.1 Zona de Estudio	19
6.1.1 Ubicación geográfica.....	19
6.1.2 Clima	20
6.1.3 Suelos	21
6.2 Vegetación.....	25
6.2.1 Bosque de Pino (<i>Pinus</i>)	25
6.2.2 Bosque de Encino (<i>Quercus</i>).....	26
6.2.3 Bosque de Oyamel (<i>Abies</i>)	27
6.2.3.1 Características del suelo	27
6.2.3.2 Sobre el funcionamiento del ecosistema	28
6.3 Muestreo de la fauna.....	29
6.3.1 Macrofauna.....	29
6.3.2 Mesofauna	32
6.4 Análisis de datos.....	33
7. RESULTADOS	34
7.1 Mesofauna	34
7.1.1 Variación altitudinal	34
7.1.2 Variación por temporada	35
7.1.3 Variación en la profundidad	36

7.1.4 Variación por grupo.....	37
7.1.4.1 Acarida	37
7.1.4.2 Collembola	42
7.1.4.3 Enchytraeidae	45
7.2 Macrofauna.....	48
7.2.1 Variación altitudinal	48
7.2.2 Variación por temporada	49
7.2.3 Variación en la profundidad	51
7.2.4 Variación por grupo.....	52
7.2.5 Análisis Multivariado	56
8. DISCUSIÓN.....	60
8.1 Mesofauna	60
8.1.1 Variación altitudinal	60
8.1.2 Variación por temporada	62
8.1.3 Variación en la profundidad	63
8.1.4 Variación por grupo.....	64
8.2 Macrofauna.....	65
8.2.1 Variación altitudinal	66
8.2.2 Variación por temporada	67
8.2.3 Variación en la profundidad	68
8.2.4 Variación por grupo.....	69
9. CONCLUSIONES.....	73
10. BIBLIOGRAFÍA	74

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Principales grupos y funciones de la fauna edáfica de acuerdo a su tamaño.....	5
Cuadro 2. Relación altitudinal con algunos grupos más abundantes de fauna edáfica.	14
Cuadro 3. Características y distribución de los tipos de suelo de la Cuenca del Río Magdalena.	24
Cuadro 4. Características de los agrupamientos jerárquicos del mediante el algoritmo de Ward y la medida de distancia de Sorensen (los colores corresponden a la Fig. 32).	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de la biota edáfica por su tamaño (Swift, <i>et al.</i> , 1979 en Palacios-Vargas y Mejía-Recamier, 2007).....	4
Figura 2. Ubicación de la Cuenca de Río Magdalena (en gris) en la delegación Magdalena Contreras, D.F. (Elaboración propia con mapas de INEGI).....	19
Figura 3. Climograma de la Magdalena Contreras (Tomado de Delgadillo, 2011).	21
Figura 4. Tipos de suelo en la Cuenca del río Magdalena (Tomado de Santibáñez-Andrade, 2009).	22
Figura 5. Vegetación y Uso de Suelo de la Cuenca del río Magdalena (Tomado de Galeana, 2008).	25
Figura 6. Pisos altitudinales muestreados en el bosque de oyamel (Modificado de Galeana, 2008).	29
Figura 7. Distribución de los monolitos en el bosque de oyamel.....	30
Figura 8. Monolito. Método de Anderson e Ingram (1993).	32
Figura 9. Revisión sistemática para la extracción de la mesofauna edáfica.....	33
Figura 10. Porcentaje de los taxa de mesofauna en el suelo del bosque de oyamel: Acarida 45%, Enchytraeidae 34% y Collembola 21%.....	34
Figura 11. Abundancia por piso altitudinal, de tres grupos de mesofauna en el suelo del bosque de oyamel.	35
Figura 12. Abundancia de los taxa de mesofauna en dos temporadas del año 2009.....	36
Figura 13 Abundancia por profundidad del suelo, de los taxa de mesofauna, en el bosque de oyamel.	37

Figura 14. Distribución de la abundancia de Acarida por profundidad y altitud en dos temporadas del año 2009. 38

Figura 15. Abundancia de ácaros edáficos en dos temporadas del año 2009..... 38

Figura 16. Distribución de los ácaros en tres profundidades del bosque de oyamel. Letras diferentes denotan diferencias significativas para la profundidad de acuerdo a la prueba *post hoc* de Tukey ($p<0.05$). 39

Figura 17. Abundancia de ácaros en tres pisos altitudinales del bosque de oyamel, durante las temporadas del año. Letras diferentes denotan diferencias significativas para la interacción Temporada-Altitud de acuerdo a la prueba LSD de Fisher ($p<0.05$). 40

Figura 18. Distribución vertical de los ácaros en el suelo del bosque de oyamel, en dos temporadas del año. La profundidad de 20-30 cm en temporada de lluvias (c) no se muestra debido a la escala. Letras diferentes denotan diferencias significativas en esta interacción de acuerdo a la prueba *post hoc* de Tukey ($p<0.05$). 41

Figura 19. Abundancia de los ácaros de acuerdo a la Altitud-Profundidad en el suelo del bosque de oyamel. La profundidad de 20-30 cm (b) en los pisos altitudinales más bajos no se muestra debido a la escala. Letras diferentes denotan diferencias significativas, en esta interacción, de acuerdo a la prueba *post hoc* de Tukey ($p<0.05$). 42

Figura 20. Abundancia de Colembolla por profundidad y altitud en dos temporadas del año 2009. 43

Figura 21. Abundancia de colémbolos edáficos del bosque de oyamel en dos temporadas del año. Letras diferentes denotan diferencias significativas de acuerdo a la prueba *post hoc* de Tukey ($p<0.05$). 43

Figura 22. Abundancia de los colémbolos en el suelo del bosque de oyamel. Letras diferentes denotan diferencias significativas de acuerdo a la prueba *post hoc* de Tukey ($p<0.05$). 44

Figura 23. Distribución de los enquitreidos en dos temporadas del año, el suelo del bosque de oyamel. Letras diferentes denotan diferencias significativas de acuerdo a la prueba *post hoc* de Tukey ($p<0.05$). 45

Figura 24. Distribución vertical de los enquitreidos en el suelo del bosque de oyamel. Letras diferentes denotan diferencias significativas en la profundidad de acuerdo a la prueba *post hoc* de Tukey ($p<0.05$). 46

Figura 25. Abundancia de los enquitreidos edáficos del bosque de oyamel, en dos temporadas del año. En la profundidad de 0-10 cm la temporada seca (c) no se muestra debido a la escala. Letras diferentes denotan diferencias significativas de acuerdo a la prueba *post hoc* de Tukey ($p < 0.05$)... 47

Figura 26. Proporción de los 15 grupos de macrofauna en el suelo del bosque de oyamel en la CRM. 48

Figura 27. Abundancia de los grupos de macrofauna en tres altitudes del bosque de oyamel en la CRM. En el eje secundario se muestra la abundancia (Núm. de Ind.) de Oligochaeta en el piso altitudinal medio (3 432 m s. n. m.). 49

Figura 28. Distribución temporal de la macrofauna del suelo en el año 2009. 50

Figura 29. Abundancia de los grupos de macrofauna en las dos temporadas del 2009. 50

Figura 30. Distribución vertical del la macrofauna en el suelo del bosque de oyamel. 51

Figura 31. Abundancia por profundidad del suelo de los grupos de macrofauna del bosque de oyamel en la CRM. 52

Figura 32. Clasificación jerárquica mediante el algoritmo de Ward y la medida de distancia de Sorensen. La línea punteada tiene el 50 % de explicación en los grupos y los sitios. Las letras y números corresponden a: S- Secas, L- Lluvias; 1- 3 372, 2- 3 432, 3- 3 491 m s. n. m.; a- 0 a 10 cm, b- 10 a 20 cm y c- 20 a 30 cm. La escala de grises denota grupos de intervalos de acuerdo a la abundancia de los grupos (blanco a gris, de menor a mayor). 57

Figura 33. Diagrama del los primeros dos ejes del análisis de correspondencia detendenciado Decorana. El punto representa los sitios y el cuadro los grupos. Las letras y números corresponden a: S- Secas, L- Lluvias; 1- 3 372, 2- 3 432, 3- 3 491 m s. n. m.; a- 0 a 10 cm, b- 10 a 20 cm y c- 20 a 30 cm. Los dos ejes explican el 40 % de la varianza total: eje 1 con 39 % y eje 2 con 0.79 %..... 59

RESUMEN

Los invertebrados terrestres desarrollan funciones muy importantes en los ecosistemas. La presencia de fauna edáfica da lugar a peculiares estructuras físico-químicas en el suelo. Estas estructuras se transforman en procesos fundamentales: la descomposición y el flujo de nutrientes; regulados principalmente por la actividad biológica, además de por la temperatura y la humedad.

El objetivo de este trabajo fue conocer la composición, abundancia y distribución de la mesofauna y macrofauna del suelo en el bosque de *Abies religiosa* de la Cuenca del Río Magdalena, D.F. Se tomaron muestras a tres altitudes: 3 372, 3 432 y 3 491 m s. n. m. En cada una se hicieron monolitos de 25 cm × 25 cm de ancho × 30 cm de profundidad, de donde se extrajo la mesofauna y macrofauna por estratos de 0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm; se realizaron cinco réplicas para dos temporadas en el año 2009. Para cada uno de los factores analizados se determinó la abundancia y grupos taxonómicos de la mesofauna y macrofauna. De 15 grupos de macrofauna, los más abundantes fueron Oligochaeta y las Larvas, mientras que en la mesofauna los ácaros fueron el grupo mejor representado. La prueba de X^2 mostró que a 3 432 m s. n. m. se distribuyó la mayor parte de macrofauna, no así la mesofauna en la cual los taxa mostraron una distribución diferencial dependiente de la altitud. Las pruebas de X^2 mostraron que en el estrato superficial de 0-10 cm de profundidad se presentó la mayor abundancia de mesofauna con 18 843 organismos y macrofauna con 1 159 organismos, respectivamente. En la temporada de lluvias la mesofauna fue más abundante, de acuerdo con la prueba de t, contrario a la temporada de secas, cuando lo fue la macrofauna. De acuerdo con el Análisis de Varianza (ANOVA factorial) aplicado a los datos, los ácaros tuvieron menor abundancia a mayor profundidad siendo esta significativa, así como las interacciones Temporada-Altitud, Temporada-Profundidad y Altitud-Profundidad. Con el mismo análisis los colémbolos tuvieron diferencias entre las dos temporadas del año ($F_{(1,72)}= 8.71$, $p \leq 0.004$) y la profundidad ($F_{(2, 72)}= 7.98$, $p \leq 0.0007$). De igual forma se encontró diferencia en la abundancia de los enquitreidos en la temporada de lluvias ($F_{(1,72)}= 8.71$, $p \leq 0.004$) y en la interacción Temporada-Profundidad ($F_{(2,72)}= 8.75$, $p \leq 0.0004$). En el caso de la macrofauna el análisis

multivariado permitió agrupar en lo general a la abundancia en la temporada de secas y como factor adicional la altitud.

En este estudio se encontró una mayor abundancia de mesofauna integrada por ácaros y enquitreidos y de macrofauna por lombrices de tierra. De los factores analizados, la temporada mostró una distribución opuesta en cuanto a la presencia de la meso y la de la macrofauna. Mientras que la altitud tuvo variaciones más relacionadas con cada uno de los grupos taxonómicos encontrados, tanto de meso como de macrofauna. La distribución vertical fue la más consistente respecto a la mayor concentración de grupos en el estrato inmediato al mantillo, donde está la mayor fuente de recursos para la meso y la macrofauna.

1. INTRODUCCIÓN

En el suelo tienen lugar muchos de los procesos cruciales para la función de los ecosistemas y representa el hábitat de muchos organismos con una gran variedad de hábitos alimenticios, tamaños, así como de varios grupos ecológicos; que van desde los estrictamente acuáticos a los obligatoriamente terrestres (Brown *et al.*, 2007).

La diversidad de vida en el suelo comprende a los organismos que pasan toda o una parte de su ciclo de vida dentro del suelo o en su superficie inmediata. Aunque generalmente no se ve, el suelo es uno de los ecosistemas más diversos de la tierra y contiene una de las más grandes colecciones de organismos vivos (Brown *et al.*, 2007). La diversidad y complejidad de formas de vida en el suelo son el testimonio de millones de años en el proceso de coevolución (entre los organismos y ambiente) que debe ser conservado a pesar de que se conozca sólo una pequeña parte de ello. Se le atribuye a los microorganismos el 90% de la mineralización de nutrientes y de ser los principales actores en los ciclos biogeoquímicos (Lavelle *et al.*, 2006).

La naturaleza de la complejidad física y química del suelo, junto con la variabilidad de poros, túneles y la gran área superficial -extremadamente variable-, proporciona materia orgánica (MO), comida, agua y sustancias químicas a varios animales, plantas y microorganismos que pueden coexistir y encontrar nichos apropiados para su desarrollo (Brown *et al.*, 2007). Así los invertebrados son responsables de muchos de los procesos importantes que ocurren en el suelo (aspecto que será abordado más adelante), por lo que algunos pueden considerarse como indicadores de aspectos de calidad basados en la composición y abundancia de las comunidades en las que se desarrollan (Lavelle *et al.*, 2006).

1.1 CLASIFICACIÓN DE LA FAUNA

Los organismos del suelo han sido clasificados de diversas formas, sobre todo taxonómicamente. Pueden dividirse en tres grandes grupos: bacterias, hongos y animales (Fragoso *et al.*, 2001). Las bacterias y hongos son parte de los microorganismos que gobiernan directamente los procesos en los ciclos de nutrientes del suelo, pero estos también son afectados por los animales que viven junto con ellos (Cole *et al.*, 2006). Sin

embargo, el sistema más usado está basado en su tamaño (Brown *et al.*, 2007; Fig. 1). Además, la fauna edáfica se puede agrupar con base a otros criterios como: permanencia en el suelo, adaptación, preferencia al suelo y régimen alimenticio (Palacios-Vargas y Mejía-Recamier, 2007).

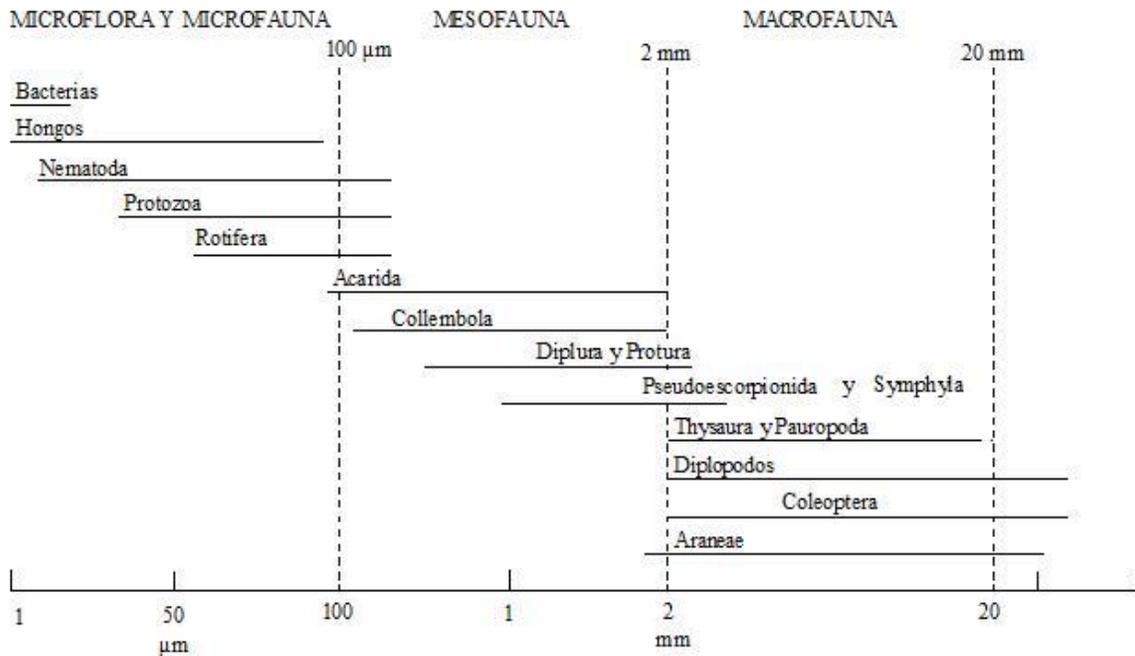


Figura 1. Clasificación de la biota edáfica por su tamaño (Swift, *et al.*, 1979 en Palacios-Vargas y Mejía-Recamier, 2007).

Para los animales del suelo se ha propuesto una subdivisión en tres categorías, de acuerdo con el tamaño (diámetro) del animal adulto (Cuadro 1) y su tipo de respiración: Microfauna, Mesofauna y Macrofauna (Fragoso *et al.*, 2001). El tamaño de esta fauna determina, en parte, la escala con la cual estos organismos van a interactuar con los factores bióticos y físicos del medio (Palacios-Vargas y Mejía-Recamier, 2007), aunque el intervalo de tamaño corporal puede ser un problema pues se incrementa el riesgo de atribuir caracterizaciones a una escala que no es aplicable a otra (Barajas-Guzmán y Álvarez-Sánchez, 2003).

Cuadro 1. Principales grupos y funciones de la fauna edáfica de acuerdo a su tamaño.

Categoría por tamaño	Taxones característicos	Funciones
Microfauna < 0.1 mm	Los protozoarios y nemátodos; también se pueden llegar a encontrar turbelarios, tardígrados y rotíferos (Lavelle, 1996; Doube y Brown, 1998).	Forman parte de una micro cadena alimenticia, principalmente de organismos acuáticos que viven en el agua que está entre las partículas del suelo y resisten la sequía por las diversas adaptaciones fisiológicas que presentan. Se alimentan de la microflora, raíces de plantas y de otros organismos de la microfauna (Lavelle, 1996; Brown <i>et al.</i> , 2007; Fragoso y Rojas, 2010).
Mesofauna 0.1 a 2 mm	Principalmente microartrópodos ácaros, colémbolos y ciertos oligoquetos pequeños del grupo de los enquitreidos. También se pueden encontrar proturos, así como micromiriápodos (Lavelle, 1996; Fragoso y Rojas, 2010).	Se encuentran en los poros del suelo que contienen aire pues son animales de respiración aérea. Se alimentan del mantillo, la microflora y microfauna, son importantes en la aceleración del ciclo de nutrientes y en pequeña escala, de la dispersión de microorganismos (Doube y Brown, 1998). La ausencia de estos puede reducir la velocidad de descomposición de la MO y como consecuencia una pérdida de nutrientes por lixiviación, ya que actúan como almacén de nutrientes (Palacios-Vargas y Mejía-Recamier, 2007).
Macrofauna > 2 mm	En los ecosistemas mexicanos comúnmente se encuentran, Oligochaeta, Gastropoda, Isoptera, Arachnida, Chilopoda, Diplopoda, Diplura, Hemiptera, Orthoptera, Blattaria, Isopoda, Dermaptera, Thysanura, Lepidoptera, Diptera, Coleoptera, Hymenoptera así como larvas de varios de estos grupos (Brown <i>et al.</i> , 2001; Fragoso y Rojas, 2010).	Comprende animales de respiración aérea que se mueven activamente a través del suelo, pueden elaborar galerías y cámaras en las cuales viven (Fragoso <i>et al.</i> , 2001). Se alimentan de componentes orgánicos dentro o en la superficie del suelo (Brown <i>et al.</i> , 2007). Dispersan microorganismos, producen importantes estructuras físicas como galerías, turrículos y montículos. Modifican gran parte del volumen del suelo y con ello las comunidades microbianas que ahí se encuentran (Doube y Brown, 1998).

1.2 FUNCIÓN DE LA FAUNA EDÁFICA EN EL ECOSISTEMA

Se ha visto que la productividad primaria en el suelo está afectada directa e indirectamente por la actividad de la biota edáfica. Los protistas, nemátodos, enquitreidos, colémbolos y ácaros, combinados con hormigas, termitas y lombrices mejoran la producción de las

plantas a lo largo del año. Sin embargo las interacciones biológicas que determinan procesos en el suelo, como la descomposición, ocurren inicialmente en rangos de días/mm³ (Lavelle y Spain, 2001). En México algunos estudios sobre descomposición por la fauna del suelo se relacionan directamente con los cambios en las tasas de descomposición, las cuáles, en el país, disminuyen a lo largo del tiempo (Álvarez-Sánchez, 2001; Lavelle *et al.*, 2006).

La biota del suelo se ha considerado como un factor relevante y útil para el beneficio del hombre. Los organismos del suelo y sus funciones individuales proporcionan un recurso importante para el manejo de la agricultura, en adición con otros servicios ecosistémicos (Barois *et al.*, 2009; Lavelle *et al.*, 2006).

Así, se considera que algunos de los servicios que provee la biodiversidad bajo el suelo (BGBD por sus siglas en inglés) son: regular los ciclos de nutrientes, regular la dinámica de la materia orgánica (MO) del suelo; producir efectos positivos en la estructura física del suelo y regímenes de agua; incrementar la cantidad y eficiencia de la absorción de nutrientes por la vegetación (a través de los hongos micorrícicos); estimular las relaciones mutualistas de microorganismos fijadores de nitrógeno; mejorar el vigor de la planta y la influencia en su salud a través de las interacción de patógenos y plagas con otros depredadores y parásitos naturales. Participan también en la regulación del clima por la acumulación de carbono en agregados estables y compactos, evitando su rápida liberación y contribución al efecto invernadero (Barois *et al.*, 2009; Lavelle *et al.*, 2006).

Otra forma de aprovechar el conocimiento de la fauna edáfica, es considerándola como indicadora del funcionamiento del ecosistema. Los artrópodos edáficos se han propuesto como bioindicadores de recuperación, ya que usando distintos niveles jerárquicos se ha observado que la recuperación a nivel edáfico puede ocurrir a tasas más rápidas que las producidas por la cobertura vegetal (Herrera y Cuevas, 2003). La fauna edáfica en los bosques templados, también puede ser buen indicador ya que se relaciona con propiedades que determinan la calidad del suelo, como el porcentaje de humedad, arena, pH, potencial de conductividad eléctrica y potasio intercambiable (Ramírez, 2008).

1.2.1 Microfauna

Los organismos de la microfauna son incapaces de moverse por largas distancias, a menos que sean arrastrados por el agua o llevados por organismos más grandes y su función es crucial en la descomposición, el reciclaje de nutrientes, la agregación del suelo y la salud de las raíces (Doube y Brown, 1998).

Los principales grupos que se reconocen, en esta clasificación, son los protozoarios, que son unicelulares y los nemátodos, que son animales microscópicos. Los primeros constituyen una población rica y heterogénea; resisten condiciones ambientales adversas, como la falta de alimento o de oxígeno, enquistándose. Se pueden encontrar entre 10 y 100 mil células por gramo pudiendo llegar a ser hasta 300 mil (Navarro, 2005). Por otra parte, los nemátodos son de vida libre o parasitarios y se estima puede haber de 6 a 18 000 millones por hectárea, en las tierras de cultivo. Los de vida libre en el suelo pueden ser bacteriófagos, fungívoros, omnívoros, depredadores, parásitos de plantas e insectos (Manzanilla-López, 2008).

1.2.2 Mesofauna

Estos organismos son poco hábiles para excavar por lo que generalmente viven en los poros del suelo, se alimentan de materia orgánica, hongos, bacterias y de otros invertebrados (Brown *et al.*, 2007). Se han encontrado patrones en la composición espacial del suelo, donde se muestran que los taxa de este grupo tienen una estructura espacial a escala pequeña (entre 25 cm y 5 m). De acuerdo con un trabajo de un gradiente pastizal-bosque, la escala de estudio para este grupo de biota edáfica podría ser a distancias de pocos centímetros (Rueda *et al.*, 2011).

Algunos de los principales grupos¹ se describen a continuación:

Los colémbolos (*Collembola*) habitan tanto en la hojarasca (la mayoría), como en el humus y en los primeros 10 cm de profundidad del suelo. Generalmente se alimentan de micelios senescentes, no digieren la celulosa ni la lignina; sin embargo son los principales trituradores de hojarasca pues el producto de esta actividad es la ingesta de las hifas. A su

¹ Nomenclatura taxonómica con base en SIIT^{*mx}-CONABIO, 2008.

vez la materia fragmentada es potencialmente utilizable por microorganismos como bacterias y hongos. La acción de los colémbolos es tan fuerte sobre las poblaciones fúngicas, que puede aumentar o disminuir la competencia de las bacterias (García, 2009).

Los ácaros (Acarida), junto con los colémbolos, usualmente constituyen más del 95% del total de los microartrópodos en el suelo (Bardgett y Cook, 1998). Los ácaros abarcan amplios gremios alimenticios, los mesostigmados en su mayoría son depredadores de vida libre, muchos otros son parásitos o simbioses de mamíferos, aves, reptiles y artrópodos; la minoría de estos se alimentan de polen o néctar (Krantz *et al.*, 2009). Entre los prostigmados se encuentran depredadores, omnívoros, algunos parásitos de invertebrados y vertebrados (Estrada, 2008). En los oribátidos se pueden encontrar saprófagos, micófagos, depredadores oportunistas de nemátodos y de otra microfauna, algunos llegan a ser necrófagos de esta última; este grupo se considera el más abundante en los bosques templados (Krantz *et al.*, 2009).

Los enquitreidos (Enchytraeidae) se encuentran principalmente en la capa orgánica del suelo y su distribución depende principalmente de la disponibilidad de agua. Se les llega a considerar como macroinvertebrados por su ubicuidad espacial (Maraldo *et al.*, 2009). Están relacionados con la descomposición de la MO porque intervienen en los procesos de humificación y reciclaje de nutrientes, favorecen la circulación del aire e infiltración del agua, debido a que sus estructuras biogénicas y galerías, aumentan el tamaño de los poros (López *et al.*, 2005).

1.2.3 Macrofauna

La macrofauna tiene diferentes efectos sobre los procesos que determinan la fertilidad del suelo y el crecimiento de las plantas. Influye directamente sobre la fertilidad, por la dinámica en la descomposición de la MO, la formación del suelo, el mantenimiento de su estructura, la disponibilidad de agua y de nutrientes para las plantas (Castro *et al.*, 2007).

Estas comunidades son altamente sensibles a perturbaciones y los cambios que experimentan pueden afectar profundamente su función dentro del ecosistema. Esto a su

vez los convierte en indicadores de los impactos humanos sobre el medio ambiente (Morales y Sarmiento, 2002).

A continuación, de manera resumida, se presentan los principales taxa² superiores de macrofauna que pueden encontrarse en el suelo:

a) Las Oligochaeta (lombrices de tierra) independientemente del tipo de ecosistema, siempre dominan en biomasa (Fragoso *et al.*, 2001), siendo más abundantes en los pastizales que en los bosques templados (Lavelle y Spain, 2001). Actualmente se conocen 142 especies de lombrices para México (Fragoso y Rojas, 2014), principalmente de tipo geófago (Fragoso, 2001).

b) Los Gastropoda (caracoles) en ambientes templados se alimentan principalmente de MO en descomposición, además de alimentarse de microorganismos vivos, muertos y de quitina. Se localizan en ambos planos, el horizontal y vertical; en los primeros 20 a 30 cm a partir de la superficie del suelo, aunque son más abundantes en los primeros 5 cm del plano vertical. Su distribución vertical varía con la humedad o la altitud (Naranjo-García, 2003).

c) Los Isopoda: Oniscidea (cochinillas) son los únicos crustáceos terrestres, la mayoría son herbívoros o carroñeros (Brusca, 1997).

d) Los Arachnida (arácnidos) más conocidos en la macrofauna son los escorpiones, arañas, pseudoescorpiones y opiliones (CONABIO, 2010); a excepción de estos últimos, que también son detritívoros, todos son depredadores (Brown *et al.*, 2001). Por lo general son de hábitos nocturnos, los que construyen sus refugios en el suelo lo hacen en áreas que satisfacen sus necesidades de luz, sombra, humedad y disponibilidad de alimento (Vázquez-Rojas y Gaviño-Rojas, 2008).

e) Los Chilopoda (ciempiés) se conocen estrictamente como depredadores, se alimentan principalmente de desintegradores secundarios, por ejemplo colémbolos y lombrices (Salamon *et al.*, 2008).

² Nomenclatura taxonómica con base en SIIT^{*mx}-CONABIO, 2008.

f) Los Diplopoda (milpiés) tienden a ser estacionalmente activos y la mayoría son detritívoros, aunque también pueden ser carroñeros. En general tienen un ciclo de vida largo y son de actividad nocturna. Retienen importantes cantidades de metales pesados y su influencia en el suelo es de tipo física y química (Bueno-Villegas, 2003).

g) Los Diplura (dipluros) son pequeños hexápodos de 0.6 a 50 mm que viven en suelo húmedo, sobre todo en la capa de 10 a 20 cm de profundidad. Generalmente son detritívoros, aunque también los hay depredadores de otros organismos que viven en el suelo (Palacios-Vargas y Mejía-Recamier, 2007).

h) Los Thysanura (Archaeognatha y Zygentoma = pececillos de plata) Generalmente miden de 10 a 20 mm de largo, se encuentran en lugares húmedos, se alimentan de material vegetal seco o en descomposición y restos de animales (Hutchins *et al.*, 2003).

i) Las Blattaria (cucarachas) son de distribución cosmopolita, tienen un tamaño de entre 3 y 100 mm. La mayoría son omnívoras o saprófagas (McGavin, 2002). En el suelo son poco abundantes, se han considerado como raras (Negrete-Yankelevich *et al.*, 2007).

j) Las Isoptera (termitas) son organismos eusociales. Se alimentan a base de productos lignocelulósicos, la mayoría habitan en climas cálidos, húmedos y bajas elevaciones. Algunas especies son fijadoras de nitrógeno atmosférico (Hutchins *et al.*, 2003; Méndez-Montiel y Equihua-Martínez, 2008).

k) Las Dermaptera (tijerillas) miden de 4 a 78 mm, viven en lugares oscuros generalmente húmedos durante el día. La mayoría son omnívoras (Hutchins *et al.*, 2003). En el suelo se han considerado como raros (Negrete-Yankelevich *et al.*, 2007).

l) Los Orthoptera (chapulines y grillos) generalmente son fitófagos, algunos son depredadores, otros se alimentan de desechos y pocas especies son omnívoras, son elongados y cilíndricos, la mayoría miden entre 2 y 100 mm (CONABIO, 2009; Gullan y Cranston, 2005; Hutchins *et al.*, 2003).

m) Los Psocoptera (piojos de los libros) se encuentran principalmente en la materia orgánica en descomposición. Se alimentan de la microflora del suelo. Presentan un tórax

ligeramente abultado hacia arriba en vista lateral, ojos compuestos prominentes y pueden ser alados o ápteros. Miden de 1 a 10 mm (McGavin, 2002).

n) Las Heteroptera y Homoptera (Hemiptera =chinchas) se alimentan sólo de fluidos. Todos los Homópteros se alimentan de savia, mientras que los Heterópteros son principalmente depredadores (Hutchins *et al.*, 2003). Las especies reportadas para el país, están dentro del grupo de los rizófagos, fitófagos y depredadores (Brown *et al.*, 2001).

ñ) Los Coleoptera (escarabajos), tanto larvas como adultos, se alimentan de una variedad de hongos, plantas y animales, todos estos vivos o muertos. Son cosmopolitas, pues se les encuentra en bosques tropicales, arroyos en zonas montañosas, desiertos e islas oceánicas (Hutchins *et al.*, 2003).

o) Los Hymenoptera (himenópteros) que incluyen a las hormigas (en el suelo se reconocen como importantes ingenieros del ecosistema), abejas y avispas, presentan a varios grupos de fitófagos, depredadores, detritívoros, omnívoros, nectarívoros y cultivadoras de hongos (Brown *et al.*, 2001). Algunos que son parasitoides (avispa) se alimentan de fluidos de plantas, néctar o fluido de sus hospederos y pocos son depredadores de otros insectos. Son de distribución cosmopolita, se encuentran en el suelo, el mantillo o sobre la vegetación. Su tamaño va de 0.15 a 120 mm (Hutchins *et al.*, 2003).

p) Las Lepidoptera (mariposas y polillas) se alimentan al succionar y lamer néctar de las flores u otros líquidos y se relacionan estrechamente con las condiciones de un lugar (Erazo y González-Montaña, 2008). Se pueden encontrar como larvas en el suelo (Fragoso y Rojas, 2010).

q) Los Diptera (moscas y mosquitos) tienen larvas fitófagas, parásitas, parasitoides o saprófagas y se encuentran en lugares húmedos. Los adultos se alimentan de fluidos, por adsorción o succión y son principalmente terrestres (Brown *et al.*, 2001; Hutchins *et al.*, 2003).

r) Las Larvas son estados inmaduros de insectos con desarrollo holometábolo, que pueden llegar a vivir esta y otras etapas de su ciclo de vida en el suelo. Pueden ser herbívoras u omnívoras y encontrarse en la superficie o dentro del suelo. Su diversidad en el suelo puede

ser muy variada: moscas (Diptera), escarabajos (Coleoptera: Melolonthidae, Sacarabaeidae, Staphylinidae, etc.), mariposas y polillas (Lepidoptera) principalmente (Fragoso y Rojas, 2010).

Con una diversidad tan grande en el suelo, se ha propuesto que debe haber una elevada redundancia funcional, es decir, que probablemente muchas especies estén llevando a cabo la misma función (Fragoso y Rojas, 2010).

Según lo encontrado por Gizzi *et al.* (2009) la meso y macrofauna se ven afectadas al someter al suelo a varios sistemas de labranza, modificando su abundancia y composición taxonómica, disminuyendo en sistemas sometidos a agricultura. En ecosistemas forestales también se ha encontrado que la densidad de microartrópodos edáficos está correlacionada positivamente con la riqueza vegetal de un determinado tipo de suelo (Eisenhauer *et al.*, 2011).

1.3 DISTRIBUCIÓN DE LA FAUNA

Es importante señalar que la complejidad en el entorno del suelo se produce en un rango de escalas espaciales. Por lo tanto, la heterogeneidad puede influir potencialmente en la diversidad de los organismos de diferentes maneras, dependiendo de su tamaño corporal y el tamaño o la unidad de hábitat estudiada.

A escala local (en rangos de centímetros a metros) los patrones de biodiversidad del suelo están, probablemente, más relacionados con la heterogeneidad del hábitat (tanto vertical como horizontal); en términos de la complejidad estructural, de la agregación y de la complejidad química de los recursos. Las variaciones en la heterogeneidad espacial y temporal del suelo, desde la escala de partículas a la de horizontes, junto con la gran especialización de la biota del suelo, actúan como el principal determinante de los patrones de la biodiversidad del suelo a escala local (Bardgett, 2005).

Se han encontrado patrones en la composición espacial del suelo, donde se muestran que los grupos de mesofauna tienen una estructura espacial a escala pequeña (entre 25 cm y 5 m). De acuerdo a lo encontrado en el estudio de un gradiente pastizal-bosque, la escala de estudio para este grupo de biota edáfica podría ser en distancias de pocos centímetros

(Rueda *et al.*, 2011), por lo que, en este estudio, se esperaría también encontrar variación en la profundidad.

Lavelle y Spain (2001) señalan, en lo general, que la superficie constituye una fuente rica en alimento para la fauna edáfica, por su cercanía con el mantillo. De esta manera la disponibilidad de los recursos que provee la MO decrece a mayor profundidad, aunque se incrementa su estabilidad lo que a su vez puede limitar la distribución de algunos organismos.

Por otro lado, para algunos grupos la humedad del suelo puede ser el factor más importante que determine su distribución, abundancia y sobrevivencia, así como la alta depredación y la baja acumulación de la materia orgánica. Se ha visto que la masa del estrato orgánico (que varía con la profundidad) también puede determinar la abundancia de los organismos (Wiwatwitaya y Takeda, 2005). Así mismo se ha encontrado que la altitud y la vegetación, en algunos bosques templados del país, influyen en la abundancia de estos organismos (Ramírez, 2008).

2. ANTECEDENTES

Además de la profundidad dentro del suelo, la altitud es otro factor importante en la distribución de la fauna edáfica. En general el declive en la riqueza de especies coincide con un incremento de altitud; esto se ha observado para árboles, mamíferos, aves, reptiles, insectos y anfibios en las zonas montañosas donde, en las partes más altas, la riqueza es menor que en las partes bajas. Aunque de forma local la distribución de las especies puede mostrar diferentes patrones (Stevens, 1992).

Algunos estudios de fauna edáfica relacionados con la presente investigación se resumen en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Relación altitudinal con algunos grupos más abundantes de fauna edáfica.

Altitud (m s.n.m)	Vegetación	Lugar	Fauna edáfica	Referencia
2 753 3 015 3 250 3 678	Bosque de encino. Bosque de encino. Bosque de oyamel. Bosque de pino.	Volcán Iztaccíhuatl, estados de México y Puebla.	Mayor abundancia de colémbolos a mayor altitud. Más colémbolos que ácaros (en lluvias).	García, 2009.
2 486 3 444 3 306 3 902	Cultivo. Bosque de pino y oyamel. Bosque de oyamel. Bosque de pino.	Parque Nacional Izta-Popo, estados de México, Puebla y Morelos.	Mayor abundancia de Colémbolos, ácaros, coleópteros y larvas de dípteros. Mayor densidad en bosque de oyamel.	Ramírez, 2008.
2 682 3 068 3 218	Cultivo. Bosque de oyamel. Bosque de oyamel y pino.	Parque Nacional Zoquiapan, estados de México y Puebla.	Mayor abundancia de Ácaros, colémbolos, larvas de coleópteros y de dípteros. Mayor densidad en bosques maduros de oyamel.	Ramírez, 2008.
1 818 3 215 3 047	Bosque de pino y encino. Bosque de pino. Bosque de oyamel.	Parque Nacional Benito Juárez, Oaxaca.	Mayor abundancia de Ácaros y colémbolos. Mayor densidad en bosque de oyamel.	Ramírez, 2008.
1 952 2 387	Bosque de pino y oyamel. Bosque de pino.	Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán, Jalisco.	Mayor abundancia de Ácaros, colémbolos, coleópteros, dípteros y otros. Mayor densidad en bosque de pino-oyamel.	Ramírez, 2008.
3 796 3 166 2 855 2 527	Bosque de pino. Bosque de oyamel. Bosque de oyamel, pino y cedro. Boque de pino.	Subprovincia Mil cumbres, estados de México y Michoacán.	Mayor abundancia de Ácaros, colémbolos, coleópteros y dípteros. Mayor densidad en bosque de pino y en bosque de oyamel.	Ramírez, 2008.
2 800* 3 059* 3 578*	Bosque de encino. Bosque de oyamel. Bosque de pino.	Cuenca del Río Magdalena, Distrito Federal.	Mayor abundancia de Ácaros en bosque de Pino. Mayor cantidad de grupos taxonómicos en bosque de encino.	Baltazar, 2011. *Calculadas con base en sus coordenadas geográficas.
3 837 4 105 5 050	Pastizal y bosque de encino. Pastizal y bosque de <i>Sabina</i> sp. Musgos y otros.	Montaña de Shergyla, Tíbet, China.	Mayor densidad de ácaros, colémbolos, dípteros, proturos y homópteros.	Jing, 2005

El cambio en la composición de especies de árboles de los bosques en las zonas templadas, ha tenido repercusión sobre la fauna del suelo. Se ha visto que la transformación de un bosque de coníferas puro a uno mixto (hayas y piceas) provocó una alteración en la fuente de recursos básicos para la fauna, pues al bajar la calidad del mantillo (proporción C:N) se producen alteraciones en la red trófica; al disminuir la densidad de lombrices se manifiesta una baja en la de depredadores (Chilopoda) quienes se alimentan principalmente de desintegradores secundarios (Salamon *et al.*, 2008).

En un bosque boreal se ha visto que la biomasa de los grupos funcionales de la fauna edáfica resulta afectada ante eventos de aclareo como consecuencia del manejo forestal. Los microvíboros y los fungívoros presentaron mayor biomasa en la zona sometida a manejo que en el bosque maduro, mientras que los depredadores siempre tuvieron la menor biomasa (Malmström *et al.*, 2009). Por otro lado, en las montañas de Neusa en Colombia se ha encontrado que en de bosques nativos hay una mayor riqueza y abundancia de artrópodos que en plantaciones introducidas de pino (León-Gamboa *et al.*, 2010).

Al agrupar la fauna de artrópodos en niveles tróficos, en un gradiente de pradera a bosque en Canadá, se encontró que la abundancia no se relaciona directamente con el gradiente. Los colémbolos, considerados como microfitófagos, no muestran variación al aumentar la productividad y los macroartrópodos depredadores incluso disminuyeron en el bosque (Ferguson, 2001).

En suelos de bosques templados de los Parques Nacionales Izta-Popo, Zoquiapan, Benito Juárez en Oaxaca, Sierra de Manantlán y Mil cumbres, entre los estados de México y Michoacán, se observó que la altitud y vegetación influyeron en la abundancia de los organismos. La densidad más alta de fauna se observó en un intervalo altitudinal de 2 800 a 3 400 m durante el otoño, la cual corresponde a una altitud media en el estudio. En éste la diversidad y abundancia mayor fue reportada en suelos bajo bosque de oyamel (Ramírez, 2008). En el caso de suelos del volcán Iztaccíhuatl con vegetación predominante de *Abies religiosa* (a 3 250 m), se encontró la mayor abundancia de colémbolos en el piso más alto (3 687 m) y en la temporada de lluvias (García, 2009).

En la Cuenca del río Magdalena, Distrito Federal (CRM) se desarrolló el Macroproyecto: “Manejo de Ecosistemas y Desarrollo Humano” cuyo objetivo general fue construir, a través del trabajo de investigación participativa e interdisciplinaria, “una red de investigación universitaria enfocada al manejo sustentable de los ecosistemas que genere modelos de ordenamiento, conservación, uso y restauración de los valores, los recursos y los servicios ambientales” (Macroproyecto, 2008).

En la zona de estudio el objetivo fue generar un Diagnóstico Ambiental del Suelo de Conservación Ecológica de Magdalena Contreras, que permitiera obtener información sobre el estado de la flora, fauna y vegetación de los ecosistemas forestales como base para proponer acciones en el contexto del manejo de ecosistemas para la conservación y restauración del área. Asimismo, se propuso destacar a las especies de mayor relevancia biológica para proponer lineamientos para su uso y conservación. Dicho proyecto se enfocó también a realizar un análisis sobre la diversidad, abundancia relativa, residencia, distribución altitudinal y tipo de vegetación en la que se distribuye la fauna, incluyendo la edáfica. Así, resultados preliminares mostraron que la fauna del suelo registrada durante el Macroproyecto (2008) mostró un patrón altitudinal en la riqueza de órdenes de los bosques de la cuenca; en el bosque de *Pinus* (se encuentra a mayores altitudes en la CRM) se encontró la menor riqueza y mayor abundancia; mientras que en el de *Quercus* (se encuentra en la menor altitud de la CRM) la mayor riqueza y menor abundancia (Macroproyecto, 2008). Este trabajo se desarrolló en el marco de dicho proyecto.

3. JUSTIFICACIÓN

El suelo es un ecosistema de gran importancia, gracias a la biota que forma parte de él y que realiza procesos como la descomposición y el flujo de nutrientes. La mesofauna y macrofauna edáfica, en ocasiones imperceptibles a simple vista, contribuyen de manera sustancial en los procesos del ecosistema.

Considerando lo anterior este estudio decidió explorar la distribución de la fauna edáfica, cuya presencia, incluso, es considerada como un indicador de la condición del ecosistema, debido a que ciertos grupos taxonómicos pueden llegar a ser clave en su funcionamiento. Particularmente el estudio de la distribución de la fauna edáfica, puede repercutir en el manejo del bosque de la Cuenca del Río Magdalena, D.F; para generar información al respecto se plantearon los siguientes objetivos.

4. OBJETIVOS

Objetivo general:

- * * Analizar la composición, abundancia y distribución de los taxa que forman la macro y mesofauna del suelo en el bosque de oyamel en la Cuenca del Río Magdalena.

Objetivos particulares:

- * * Conocer la composición de los taxa de la macrofauna y mesofauna del suelo en el bosque de oyamel.
- * * Determinar la abundancia para cada uno de los taxa superiores.
- * * Comparar la abundancia y composición de los taxa de organismos en un gradiente altitudinal del bosque de oyamel.
- * * Comparar la abundancia y composición de los taxa de organismos en dos temporadas del año.
- * * Comparar la abundancia y composición de los taxa en distintas profundidades del suelo.

5. HIPÓTESIS

Si la abundancia, composición y distribución de la mesofauna y macrofauna edáfica del bosque de oyamel en la cuenca del Río Magdalena se ve afectada directamente por factores como la altitud, profundidad y la temporada del año, entonces se esperaría que:

- * La abundancia de mesofauna será principalmente grupos de ácaros y colémbolos; mientras que en la de la macrofauna serán principalmente lombrices, pues estos taxones suelen ser dominantes en este tipo de bosques.
- ** La mayor abundancia y número de taxones se encontrará en el piso altitudinal más bajo, el cual tendrá menor variabilidad estacional ya que será más cálido respecto a los de mayor altitud.
- * La mayoría de los grupos se encontrarán en la temporada de secas, ya que será la más cálida y la de mayor acumulación de mantillo.
- ** En el estrato de menor profundidad de 0 - 10 cm, será donde se encuentre la mayor fuente de materia orgánica como recurso, por lo que se encontrarán más grupos con más individuos.

6. MÉTODOS

6.1 ZONA DE ESTUDIO

6.1.1 Ubicación geográfica

La Magdalena Contreras es una delegación periférica del Distrito Federal situada al suroeste del mismo (Fig. 2). Su territorio está conformado por un área urbana (17.95 %) y otra nombrada como área de conservación ecológica (82.05 %), conocida de manera popular como el bosque de los Dinamos (Álvarez, 2000).

La cuenca alta del río Magdalena se localiza al suroeste del valle de México, en la vertiente occidental de la Sierra de las Cruces. Pertenece a la provincia fisiográfica del Cinturón Volcánico Transmexicano (Luis, 1987). Limita al Norte con el área urbana de la delegación Magdalena Contreras, al Este, Sureste y la porción Sur-Sureste colinda con la zona montañosa del Ajusco (delegación Tlalpan), hacia el Oeste con el Parque Nacional Desierto de Los Leones (delegación Álvaro Obregón) y en el límite extremo del Suroeste con el Estado de México (Álvarez, 2000). Cubre una superficie de 34.8 km² (INEGI, 2005). Sus coordenadas extremas son 19° 15' latitud Norte y 99° 17' 30'' longitud Oeste (Jujnovsky, 2003; Fig. 2).

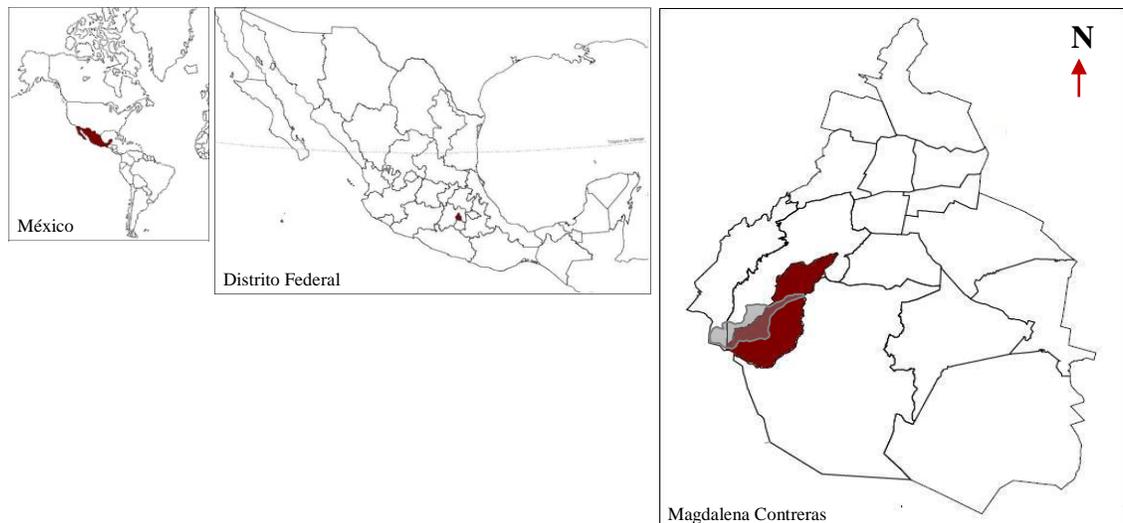


Figura 2. Ubicación de la Cuenca de Río Magdalena (en gris) en la delegación Magdalena Contreras, D.F. (Elaboración propia con mapas de INEGI).

6.1.2 Clima

El gradiente altitudinal conlleva a la existencia de dos tipos de clima en la Cuenca del Río Magdalena. En la parte urbana y hasta los 3 050 m s. n. m. se presenta el clima templado subhúmedo y en la parte más alta, entre los 3 100 a los 3 800 m s. n. m, el clima es semifrío (Almeida-Leñero *et al.*, 2007).

Según la clasificación de Köppen modificada por García (2004), el clima es templado subhúmedo y corresponde a un **C(w₂)(w)b(i')**. Este es templado subhúmedo, el más húmedo de los subhúmedos, con régimen de lluvias en verano y porcentaje de lluvia invernal menor al 5 %. La temperatura media anual está entre 12° y 18° C, la del mes más frío entre -3° y 18° C y la del mes más caliente entre 6.5° y 22° C. El verano es fresco y largo con poca oscilación térmica (García, 2004).

El clima semifrío corresponde al **C(b')(w)bi**, este es de verano fresco y largo, régimen de lluvias de verano, lluvia invernal menor al 5 % e isotermal, es decir, con una oscilación térmica menor a 5° C (García, 2004).

Santibáñez-Andrade (2009) reporta la existencia de dos variantes del clima templado subhúmedo, específicamente para el área que comprende el bosque de *Abies religiosa*. Entre los 2 400 y 2 800 m s. n. m. se presenta el Clima **C(w₂)(w)(b)i'**, con las características propias de este clima, temperatura media anual entre 12° y 18° C y con poca oscilación térmica. En la parte más alta (entre los 2 800 a los 3 500 m s. n. m.) se presenta el clima **Cb'(w₂)(w)(b')i**, con las mismas características de este clima, sólo difiere con el anterior por tener una temperatura media anual entre 5° y 12° C y oscilación térmica menor a 5° C, es decir isotermal (Fig. 3).

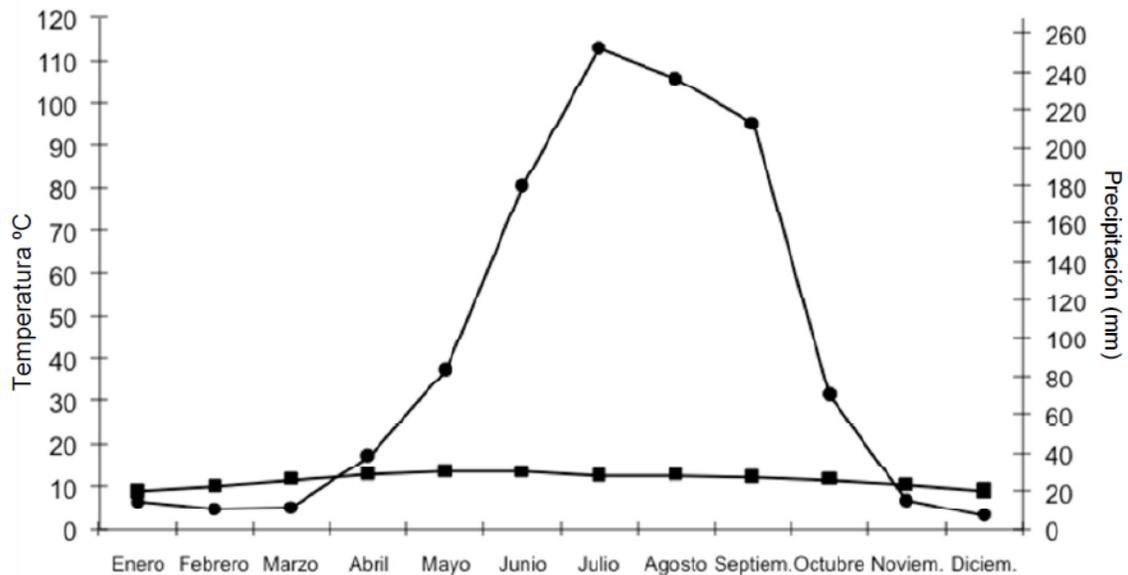


Figura 3. Climograma de la Magdalena Contreras (Tomado de Delgadillo, 2011).

La cuenca del Valle de México se localiza en la zona intertropical, pero el aumento de altitud influye en el descenso de temperatura (Jujnovsky, 2003). De acuerdo con el gradiente térmico calculado por Álvarez (2000) la temperatura en esta zona disminuye 0.72° C por cada 100 m de altitud.

6.1.3 Suelos

Los suelos de la Cuenca del Río Magdalena se originaron a partir de materiales piroclásticos no consolidados (como ceniza volcánica) que yacen sobre rocas ígneas intermedias (como andesitas y dacitas) o sobre rocas ígneas volcánicas piroclásticas consolidadas (tobas). Estos suelos representan superficies amplias de relieve montañoso volcánico, el cual conforma un conjunto de estructuras tectovolcánicas muy accidentadas y de gran elevación con relieves escarpados. Predominan particularmente las laderas con pendientes de 12 a 25 % y laderas fuertemente escarpadas con pendientes mayores del 75 % (Plan Maestro de Manejo Integral y Aprovechamiento Sustentable de la Cuenca del Río Magdalena, 2008).

La cuenca presenta cinco tipos de suelo (Fig. 4): Andosol húmico (Ah), Andosol ócrico (Ao), Feozem háplico (Fh), Feozem lúvico (Fl) y Litosol (Lit) (Santibáñez-Andrade, 2009); estas unidades edafológicas tienen diferentes características y distribución (Cuadro 3).

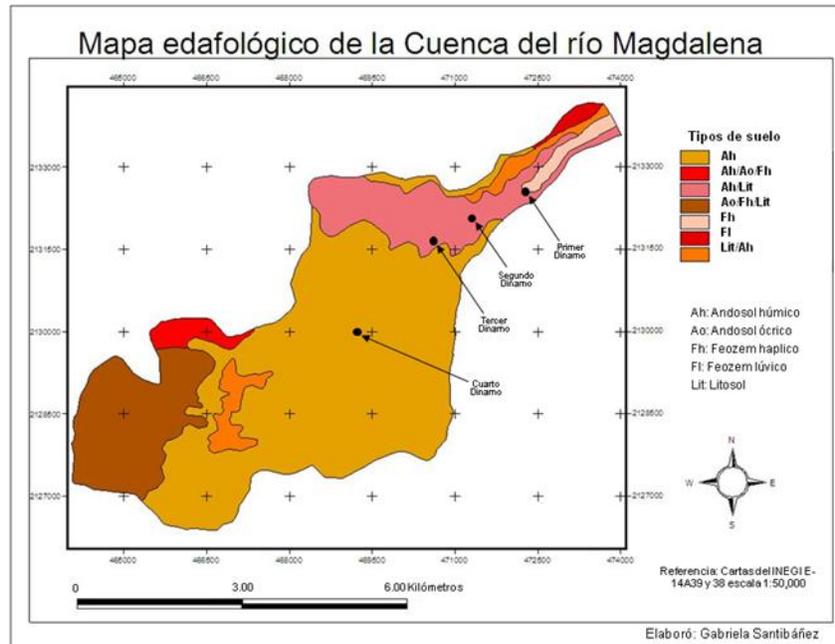


Figura 4. Tipos de suelo en la Cuenca del río Magdalena (Tomado de Santibáñez-Andrade, 2009).

Características físicas

En estos suelos se han registrado dos tipos de textura: franco-arenoso y arenoso-franco, siendo el primero el dominante. Los porcentajes de las fracciones de arenas oscilan del 67 al 88 %, de limos entre 3 a 18% y de arcillas el 15%. La humedad promedio del suelo es de 43 %, oscilando entre 15 a 90 %; tiene una relación directa con la estacionalidad, así como con el tipo de textura, estructura y buen drenaje (Macroproyecto, 2008).

Características químicas

Los valores promedio en el suelo de este bosque son un pH de 5.41, Carbono total de 145.82 mg/g, Nitrógeno total de 7.92 mg/g y una proporción Carbono/Nitrógeno de 18.41 (Delgadillo, 2011). Las concentraciones de fósforo registradas tienen un promedio de 0.089 mg/kg, encontrando valores que oscilan entre 0.014 y 0.246 mg/kg. Estas concentraciones están dentro de los intervalos esperados en suelos derivados de cenizas volcánicas, los cuales se caracterizan por una baja cantidad de fósforo disponible y por la alta fijación del fósforo en los sitios de carga variable de los minerales amorfos (Macroproyecto, 2008).

Cuadro 3. Características y distribución de los tipos de suelo de la Cuenca del Río Magdalena.

Nombre	Características principales (IUSS y WRB, 2007).	Distribución (Nava, 2003; Jujnovsky, 2003; IUSS y WRB, 2007).
Andosol	Negros, de paisajes volcánicos. Material parental compuesto de vidrios, eyecciones volcánicas (ceniza, tufa, pómez y otros) u otro material rico en silicato.	En ambientes ondulados a montañosos, húmedos y regiones árticas a tropicales con un amplio rango de tipos de vegetación.
Andosol húmico	Con las características anteriores, con 1 % más de contenido de carbono orgánico en la fracción de tierra fina y hasta una profundidad de 50 o 100 cm desde la superficie del suelo mineral.	Es el suelo predominante, se encuentra desde la zona urbana, hasta el primer dinamo.
Andosol ócrico	Con las propiedades de los andosoles y una capa de suelo superficial mineral de 5 cm o más de espesor, con un color que se vuelve más oscuro por humedecimiento, un contenido de carbono orgánico menor de 0.4 %, una estructura laminar en 50 % o más del volumen, y una costra superficial.	Se encuentra en la porción Suroeste, límite con el estado de México y en la parte Este, límite con la delegación Tlalpan entre los 3 000 y 3 100 m s. n. m.
Feozem	Oscuros ricos en MO; el material parental es de materiales no consolidados, predominantemente básicos, eólicos (loess), till glaciario y otros.	En ambientes de cálidos a frescos, regiones moderadamente continentales, suficientemente húmedas; tierras llanas a onduladas.
Feozem háplico	Con las características de los Feozem y una expresión típica de ciertos rasgos, típica en el sentido de que no hay una caracterización adicional o significativa.	Se encuentran de manera interrumpida en el límite con el área urbana al Noreste de la cuenca.
Feozem lúvico	Con las propiedades de los Feozem y un horizonte subsuperficial (árgico) que tiene claramente mayor contenido de arcilla que el horizonte suprayacente, presenta una diferenciación textural.	Son una porción reducida en la parte Norte de la cuenca.
Litosol	Dentro del grupo de suelos someros, el material parental es de varios tipos de roca continua o de materiales no consolidados con menos de 20 % (en volumen) de tierra fina.	En tierras de altitud media o alta, con topografía fuertemente disectada. La mayoría en regiones secas cálidas o frías), en particular en áreas fuertemente erosionadas.

6.2 VEGETACIÓN

La vegetación de la cuenca del río Magdalena (Fig. 5), está representada principalmente por tres comunidades de bosques: *Pinus hartwegii*, *Abies religiosa* y Mixto de *Pinus* y *Quercus*. Se han registrado 98 familias, 331 géneros y 729 especies, incluyendo 37 variedades y 24 subespecies de plantas vasculares y no vasculares (Macroproyecto, 2008).

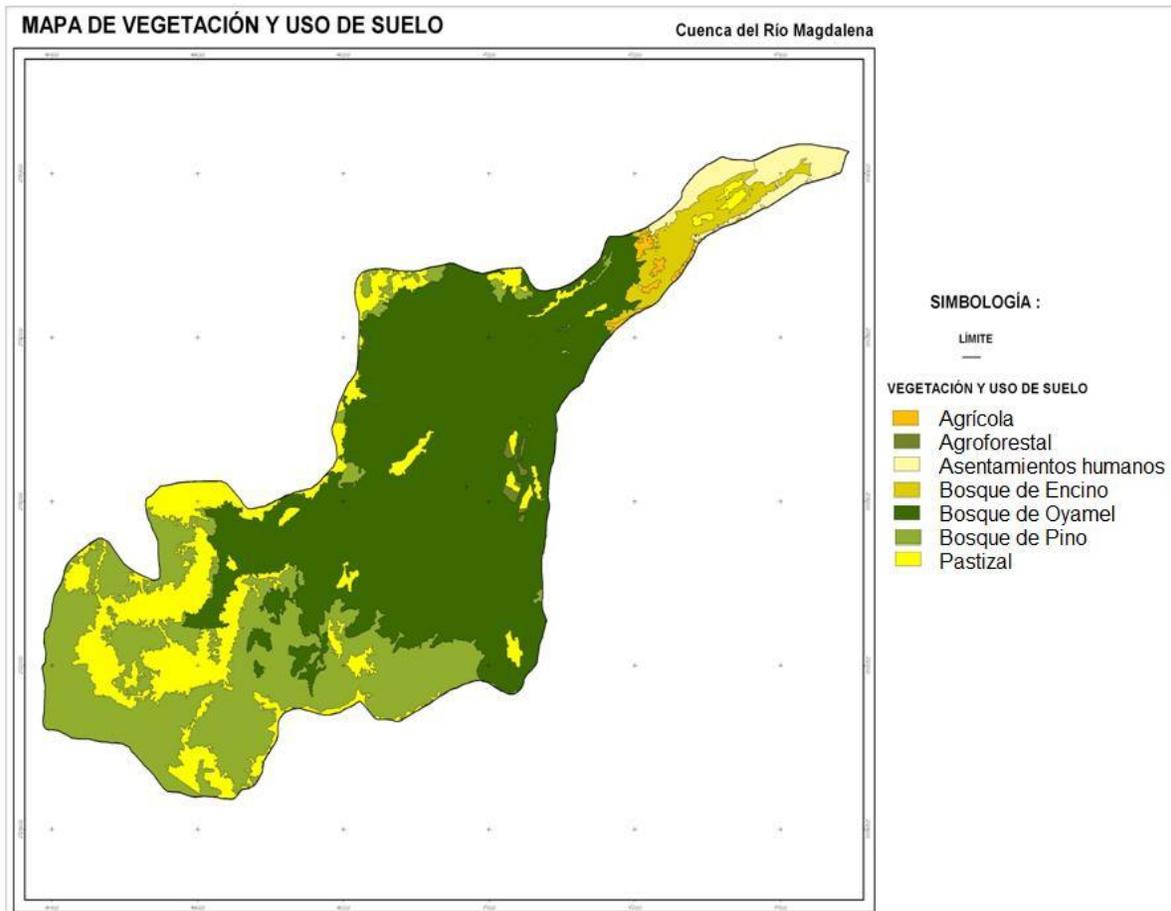


Figura 5. Vegetación y Uso de Suelo de la Cuenca del río Magdalena (Tomado de Galeana, 2008).

6.2.1 Bosque de Pino (*Pinus*)

Los pinares son comunidades características de las montañas de México. Las asociaciones vegetales donde prevalecen varias especies del género *Pinus* se encuentran en altitudes de 2 350 a 4 000 m s. n. m. y son siempre verdes en función de la fenología de los árboles dominantes. Prosperan en lugares donde la precipitación va de los 700 a 1 200 mm anuales. Crecen en suelos profundos o someros y a veces bastante rocosos. Los pinares de mayor

altitud son los de *P. hartwegii*, se desarrollan entre los 2 900 y 4 000 m s. n. m. sobre laderas de fuertes pendientes. Son relativamente bajos (5 a 20 m de altura), medianamente densos, cerca del límite de la vegetación arbórea la cobertura del estrato herbáceo suele ser superior a la de los árboles. En general los bosques son puros, pero también se ha observado en comunidades mixtas (Rzedowsky, 1975).

La comunidad de *P. hartwegii* se localiza en la parte alta de la cuenca (3 400 - 3 800 m s. n. m.). Está dominada por un estrato arbóreo monoespecífico y abierto, que presenta en promedio 65 % de cobertura vegetal y 35 % de suelo desnudo (Macroproyecto, 2008).

6.2.2 Bosque de Encino (*Quercus*)

Los encinares arbóreos son también frecuentes en la zona montañosa del Valle de México. Prosperan en altitudes ente 2 350 y 3 100 m s. n. m. sobre suelos profundos o someros, en áreas donde llueve de 700 a 1 200 mm en promedio anual, ocupando hábitats similares a los del bosque de pino. En su mayoría los bosques de *Quercus* del Valle de México son bajos, pues miden de 5 a 12 m y moderadamente densos. Muchos pierden las hojas por un periodo de varias semanas, otros son prácticamente perennifolios. Entre los 2 500 y 2 800 m s. n. m. el bosque de *Quercus rugosa*, de hojas moderadamente grandes y rígidas, es el más característico. Este bosque puede ser puro o en asociación con otras especies de *Quercus*, *Arbutus*, y algunas especies de *Pinus*. Algunos de estos bosques alcanzan una altura de 25 metros. A mayores altitudes, entre los 2 800 y 3 100 m s. n. m, es más extendido el encinar de *Q. laurina*, de hojas relativamente delgadas y más bien bajo. Con este árbol conviven en ocasiones *Q. crassifolia*, *Q. rugosa*, *Abies*, *Arbutus*, *Juniperus*, y algunas especies de *Pinus*. A nivel de estrato arbustivo y herbáceo son muy numerosas las especies que viven en los encinares (Rzedowsky, 1975).

El Bosque Mixto de *Pinus* y *Quercus*, se localiza en la parte baja de la cuenca (2 600 – 3 300 m s. n. m.). Se caracteriza por la mezcla de diferentes especies arbóreas, siendo este estrato el que domina sobre el área. El porcentaje de cobertura vegetal es de 80 % y las asociaciones que la conforman son: *Quercus laurina* - *A. religiosa*, *Q. laurina* - *Quercus rugosa* y *Pinus patula* - *Cupressus lusitánica* - *Alnus jorullensis* ssp. *jorullensis* (Macroproyecto, 2008).

6.2.3 Bosque de Oyamel (*Abies*)

Se presenta generalmente en zonas de 2 700 a 3 500 m s. n. m, casi siempre sobre suelos profundos, bien drenados, ricos en materia orgánica y húmedos durante todo el año. La precipitación media anual es superior a los 1 000 mm y menos de cuatro meses secos. Los sustratos geológicos de estos bosques son predominantemente de origen volcánico (Rzedowsky, 1975; Rzedowsky, 1994).

El bosque de oyamel a menudo se presenta puro y entonces una de las especies de *Abies* constituye el componente único del estrato arbóreo superior. En dichas masas forestales suele dominar *A. religiosa*. Cuando son bosques mixtos puede haber árboles de los géneros *Pinus*, *Quercus*, *Pseudotsuga* y *Cupressus*. La altura de la comunidad varía entre 20 y 40 m, aunque puede alcanzar los 50 m; las copas de los árboles presentan un contorno triangular. En condiciones naturales puede ser denso, lo que limita al estrato arbustivo y herbáceo. El estrato rasante está dominado por musgos y también se observan en él numerosos hongos basidiomicetos durante la época de lluvias (Rzedowsky, 1994).

En la Cuenca del Río Magdalena la comunidad de *A. religiosa* se ubica en la parte media de 2 750 – 3 500 m s. n. m. Es un bosque denso que alcanza 100 % de cobertura vegetal, dominado por la presencia del estrato arbóreo y arbustivo. En extensión es el bosque más amplio dentro de la cuenca con aproximadamente 1 900 ha. Se presenta en pendientes desde planas (0 - 10°) hasta inclinadas (10 - 50°), pero los rodales más vigorosos se desarrollan en pendientes de 30 grados. Se le puede encontrar en laderas de cerros principalmente con orientación N, NW y E. Las asociaciones que lo representan son: *A. religiosa-Roldana angulifolia*, *A. religiosa-Acaena elongata* y *A. religiosa-Senecio cinerarioides*, esta última presenta condiciones avanzadas de deterioro por incendios (Macroproyecto, 2008; Santibáñez-Andrade, 2009).

6.2.3.1 Características del suelo

En el bosque de oyamel se encuentra el suelo más ácido (pH 4.9), el valor más alto de materia orgánica (36.5 %) en diferentes grados de descomposición y los valores más altos de nitrógeno total y proporción C:N (20.18). Un valor alrededor de 20 en la proporción C:N indica que el recurso es de alta calidad. La capacidad de intercambio catiónico (CIC)

también presenta un valor alto de 43.42, que probablemente esté relacionado con los menores niveles de perturbación (Macroproyecto, 2008).

6.2.3.2 Sobre el funcionamiento del ecosistema

En el bosque de oyamel la caída de hojarasca presenta una media mensual de 414.50 g cm^{-2} ; el promedio diario reportado es de $1.25 \text{ gm}^{-2} \text{ día}^{-1}$, dónde la caída más baja por día se registró en febrero – marzo, siendo esta de 0.493 gm^{-2} y la más alta en agosto-septiembre con $2.006 \text{ gm}^{-2} \text{ día}^{-1}$ (Macroproyecto, 2008; Delgadillo, 2011).

El valor de humedad relativa más bajo es de 74.58 % y el más alto de 87.94 %, estos valores son, a su vez, los más altos de la zona. La velocidad de descomposición en el bosque de *Abies* es de 0.12 g día^{-1} (Macroproyecto, 2008). En el bosque de oyamel la humedad relativa promedio es de 65.42 % (Delgadillo, 2011).

La productividad primaria neta aérea (PPNA) para este bosque fue estimada en $10.7 (\pm 1.13) \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, que se considera es baja comparada con otros bosques templados del mundo. El incremento de biomasa aérea (IBMA) se considera el componente más importante, porque es el que más aporta a la PPNA. Así el IBMA fue de $5.72 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, lo que en proporción refleja un estado de madurez del bosque. Así mismo la mayor acumulación anual de hojarasca (en comparación con los otros de la CRM) ocurrió en este bosque con valores cercanos a $5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Delgadillo, 2011).

La proporción de Carbono - Nitrógeno (C:N) en el suelo de la cuenca es de 20.18, mientras que en el mantillo es de 49.69 y en la hojarasca de 40.56; para estas últimas se considera que prácticamente no hay cambio en la proporción de estos elementos. La temperatura más baja del suelo y aire se reporta en el bosque de oyamel, en el mes de noviembre. Este bosque se considera como el menos perturbado (en comparación con el de *Pinus* y *Quercus*) por presentar la mayor riqueza de fauna del suelo (Macroproyecto, 2008).

6.3 MUESTREO DE LA FAUNA

6.3.1 Macrofauna

El muestreo se realizó en dos temporadas del año: en el mes de marzo los días 5, 11 y 12 (temporada de secas); y los días 19 de agosto, 21 y 23 del mes de septiembre del 2009 (temporada de lluvias). Se seleccionaron tres sitios desde la parte más baja (3 372 m s. n. m.) del bosque de *Abies*, donde dejaban de aparecer individuos de *Quercus*, hasta lo más alto (3 491 m s. n. m.), antes de encontrar individuos de *Pinus*. Se buscaron características similares de composición vegetal.

Cada día de muestreo correspondió a un piso altitudinal dentro del bosque de oyamel; esto fue a 3 372, 3 432. y 3 491 m s. n. m (Fig. 6).

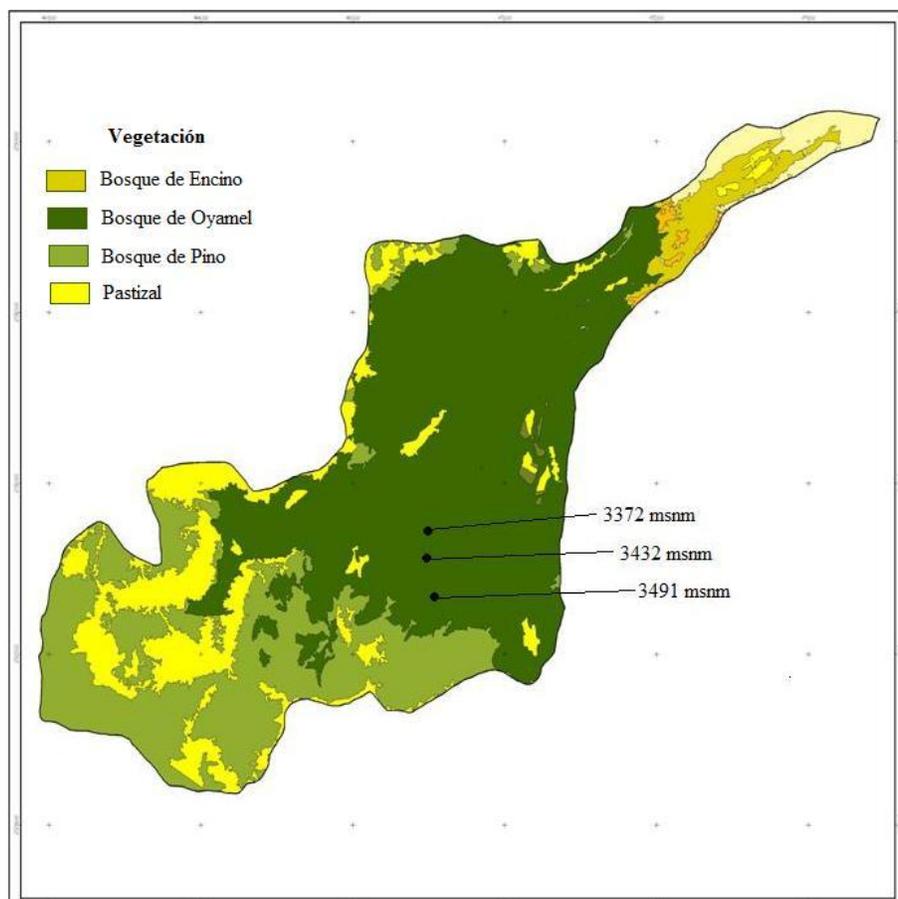


Figura 6. Pisos altitudinales muestreados en el bosque de oyamel (Modificado de Galeana, 2008).

Se siguió el método propuesto por Anderson e Ingram (1993), adoptado por el Programa de Biología y Fertilidad de los Suelos Tropicales (TSBF, por su acrónimo en inglés; Anderson e Ingram, 1993). Para ello se hicieron cinco monolitos (replicas) con orientación Este–Oeste, por cada piso altitudinal (Fig. 7) y por cada temporada del año (30 en total). La separación entre el centro de cada uno de estos fue de 10 metros. Cada monolito consistió en un bloque de suelo de 25 cm × 25 cm (0.06 m²) × 30 cm de profundidad.

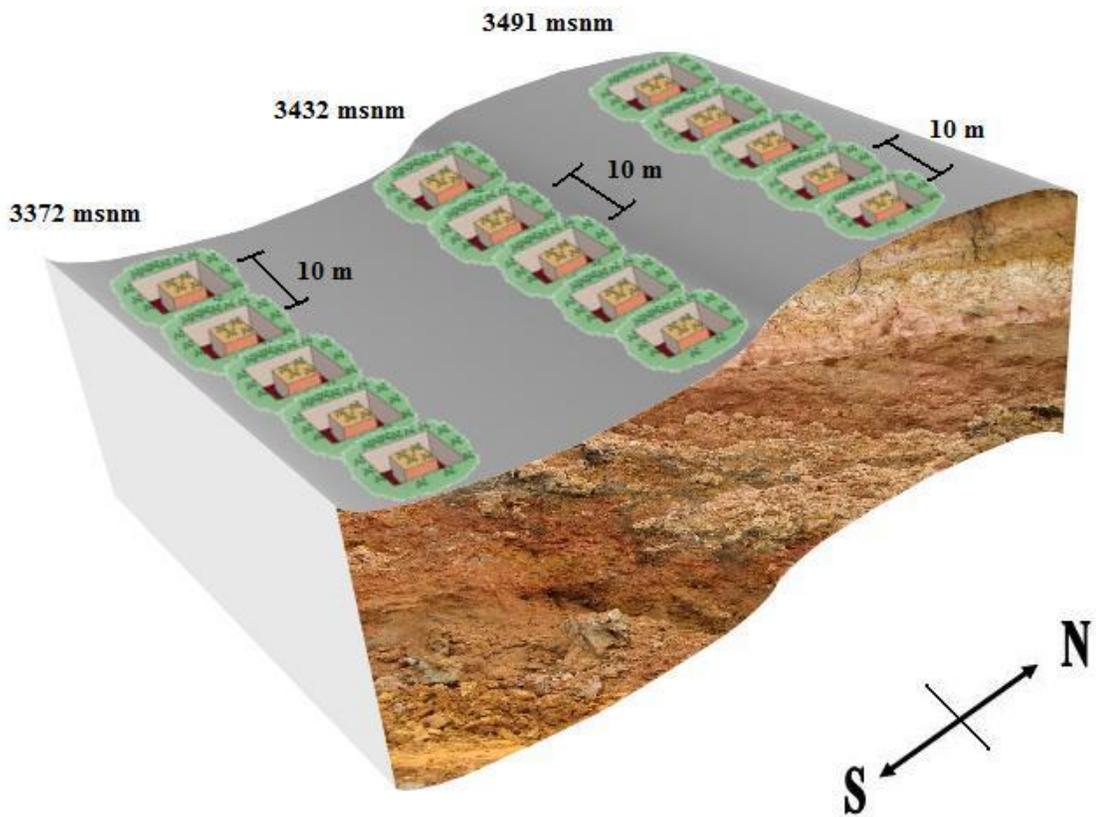


Figura 7. Distribución de los monolitos en el bosque de oyamel.

Posteriormente:

1. Se colocó un marco de metal de 25 cm × 25 cm, tomando como centro una coordenada seleccionada y geoposicionada para la zona. La hojarasca del interior del marco se colocó fuera de éste.
2. Una vez removida la hojarasca de la superficie del suelo, se comenzó la extracción de suelo para su revisión.
3. El monolito se aisló, de los 25 cm × 25 cm del marco de metal, por una trinchera de 20 cm de ancho × 30 cm de profundidad (Fig. 8). El monolito expuesto, en dos de sus caras, se dividió de acuerdo a su profundidad en tres estratos; de 0-10 cm (denominado como “a”), de 10-20 cm (b) y de 20-30 cm (c).
4. El suelo de cada estrato se colocó en bandejas de plástico y se separó manualmente, a las lombrices de tierra de otros invertebrados.
5. Las lombrices colectadas se depositaron en un frasco con formol al 4 %. De igual manera los demás invertebrados se recogieron con pinzas y se colocaron en un frasco con etanol al 70 %.
6. Las lombrices se lavaron, en el laboratorio, con agua limpia y se colocaron en un frasco con formol al 4%. Durante el lavado se marcó el número de lombrices para separar las completas de individuos fragmentados.
7. Los demás invertebrados se pusieron en un frasco con etanol al 70 %.

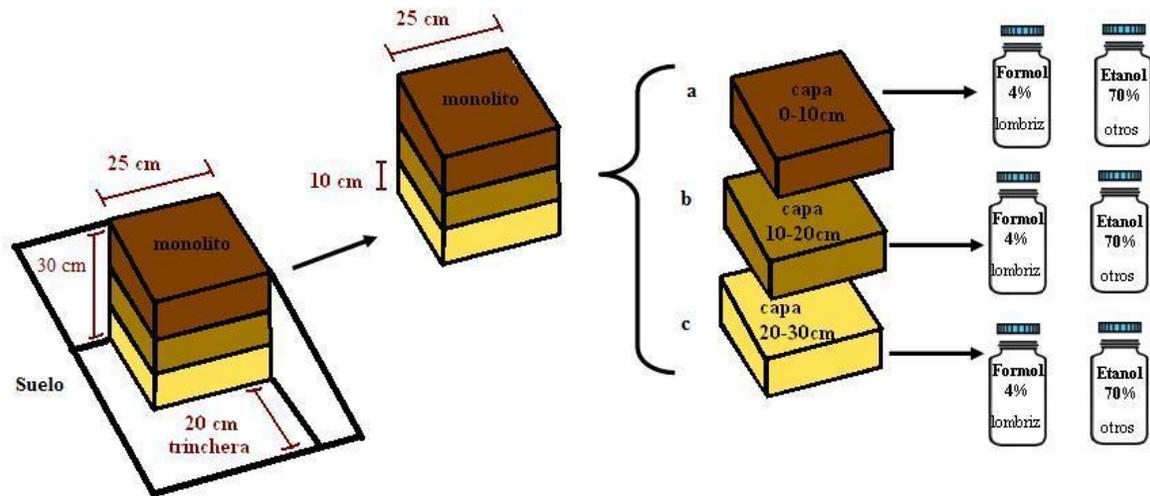


Figura 8. Monolito. Método de Anderson e Ingram (1993).

Todos los invertebrados se cuantificaron por estrato, determinándose también el total de cada monolito para cada piso altitudinal, en las dos temporadas del año y se separaron por taxa³.

6.3.2 Mesofauna

Se tomó una muestra con un cilindro de metal, con un volumen de 147.26 cm³, para la separación de los organismos correspondientes a la mesofauna; cinco por cada piso altitudinal y en las dos temporadas del año (30 en total). Estas se tomaron al mismo tiempo y lugar que los monolitos de donde se extrajo la macrofauna. Se separaron por estratos: de 0 a 10 cm, de 10 a 20 cm y de 20 a 30 cm. En el laboratorio se pesaron, se revisaron minuciosa y sistemáticamente, de forma manual (*hand-sorting*), con apoyo de un microscopio estereoscópico (Zeiss. Stemi DV4, aumento 8x – 32x). Todos los organismos que se contaron y determinaron fueron depositados en frascos con alcohol al 70 %, según su taxa correspondiente (Fig. 9).

³ Nomenclatura taxonómica con base en SIIT^{mx}-CONABIO, 2008.



Figura 9. Revisión sistemática para la extracción de la mesofauna edáfica.

La nomenclatura taxonómica de los grupos de macrofauna y mesofauna se homogenizó con base en el portal electrónico del Sistema Integrado de Información Taxonómica-México de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (SIIT-CONABIO, 2008).

6.4 ANÁLISIS DE DATOS

Se realizó una prueba de X^2 a los datos obtenidos de los grupos de meso y macrofauna, para determinar si había diferencias entre la distribución de la fauna en altitud y profundidad. Esta prueba se hizo con los grupos mayores a cinco individuos en altitud y profundidad. Para los grupos de fauna ($N > 30$) se realizó una prueba de t para ver si había diferencias significativas entre las temporadas del año. Se normalizaron los datos con base a $2\sqrt{X+0.5}$. En el caso de la mesofauna se realizó un Análisis de Varianza (ANOVA) factorial y una prueba *post hoc* de comparación múltiple de medias de Tukey, para determinar si existen diferencias entre las medias de la población (Zar, 1999). Cuando se encontraron diferencias significativas en el ANOVA global, pero no en las pruebas *a posteriori* de Tukey por grupos homogéneos y diferencias significativas, se analizaron por la prueba LSD de Fisher debido a que eran marginalmente significativas. Estas pruebas se realizaron con el paquete STATISTICA 8.0 portable.

Complementariamente, en el caso de la macrofauna se realizó un Análisis Multivariado por el método de aglomeración jerárquica, para ubicar las observaciones dentro de los grupos de la macrofauna, agrupar las variables altitud, profundidad y temporada del año, o bien determinar si los grupos estaban dispuestos aleatoriamente (Pla, 1986). Se hizo un análisis por agrupación de dos vías, mediante el algoritmo de Ward y la medida de distancia de Sorensen y un análisis de correspondencia Decorana (Mangeaud, 2004). Los análisis de ordenamiento y agrupamiento se hicieron con el paquete PC-ORD v.5.10.

Para las gráficas y manejo de datos se usaron los programas SigmaPlot y Excel 2007, respectivamente.

7. RESULTADOS

7.1 MESOFAUNA

En total los organismos de la mesofauna fueron 33 359. Los taxa fueron Acarida con 14 897 individuos (ind.), Enchytraeidae con 11 332 ind. y Collembola con 7 130 ind. (Fig. 10).

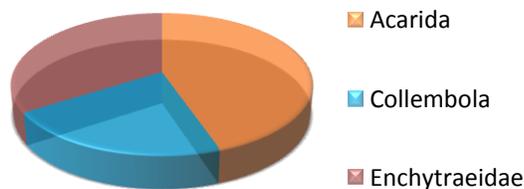


Figura 10. Porcentaje de los taxa de mesofauna en el suelo del bosque de oyamel: Acarida 45%, Enchytraeidae 34% y Collembola 21%.

7.1.1 Variación altitudinal

En la zona baja (3 372 m s. n. m.) se encontraron 4 711 ind. de Enchytraeidae, 4 584 de Acarida y los menos abundantes fueron los colémbolos. En la parte media (3 432 m s. n. m.) los ácaros fueron los más abundantes y los colémbolos, igual que en el piso anterior, los menos abundantes. En la parte más alta (3 491 m s. n. m.) los más abundantes fueron los Acarida, mientras que de Collembola y Enchytraeidae se encontraron 2 928 y 2 419, respectivamente (Fig. 11).

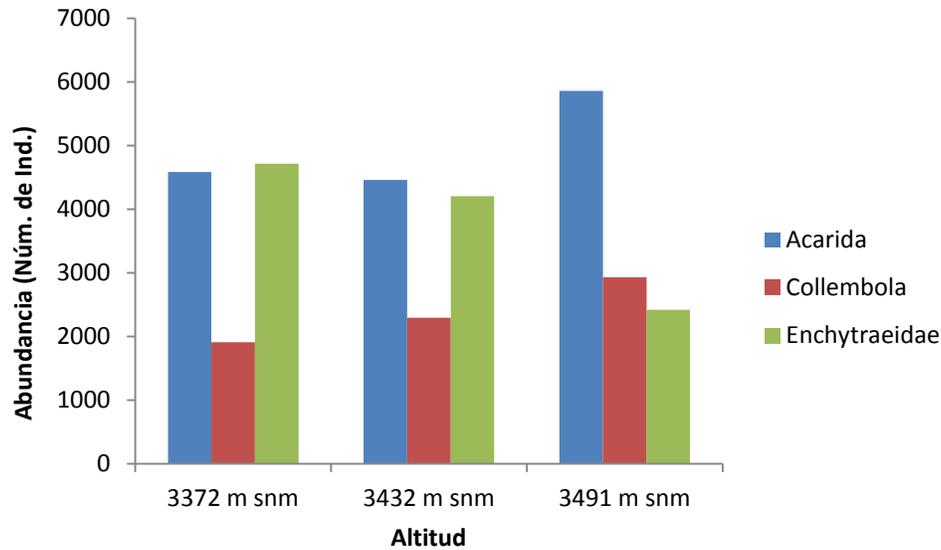


Figura 11. Abundancia por piso altitudinal, de tres grupos de mesofauna en el suelo del bosque de oyamel.

La abundancia entre colémbolos y enquitreidos fue inversa ya que aumentó junto con la altitud en los primeros, y disminuyó conforme aumentó la altitud en los segundos. Mientras que los ácaros no mostraron ese patrón. Las diferencias en la distribución de todos los taxa, de acuerdo a la altitud fueron significativas ($\chi^2 = 1220.3$, $p \leq 0.001$).

7.1.2 Variación por temporada

En la temporada de lluvias los enquitreidos y colémbolos fueron los más abundantes, razón que se invierte en la temporada seca al presentar la menor abundancia (764 ind. y 1 910 ind. respectivamente). En cambio, los ácaros fueron el grupo más abundante durante la temporada seca (Fig. 12).

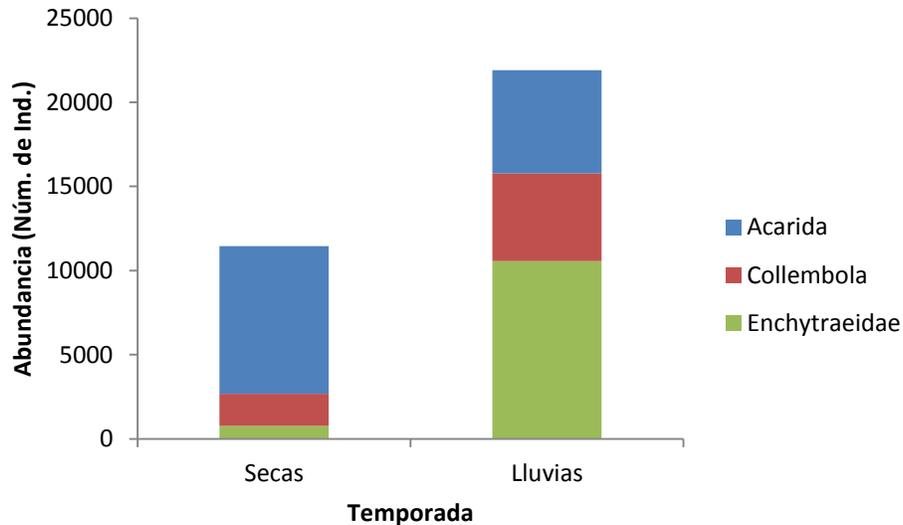


Figura 12. Abundancia de los taxa de mesofauna en dos temporadas del año 2009.

En la temporada de lluvias los ácaros fueron más abundantes que los colémbolos, quienes junto con los enquitreidos, mostraron una distribución dependiente de la humedad. La prueba de t mostró diferencias significativas entre temporadas (secas y de lluvias), en la abundancia total de la mesofauna ($t_{(0.05, 268)} = -2.34, p \leq 0.02$) entre las dos temporadas del año.

7.1.3 Variación en la profundidad

En la capa del suelo inmediata a la superficie (0-10 cm de profundidad) se encontró mayoritariamente al grupo de Acarida con 8 785 individuos, seguido de Enchytraeidae y en menor abundancia los Collembola (Fig. 13).

En la profundidad media (10-20 cm) la abundancia de Acarida, Collembola y Enchytraeidae disminuyó con respecto a la abundancia observada en la superficie, con 5 984, 3 947 y 2 928 ind., respectivamente. Estas abundancias se invierten con la profundidad, ya que de 20 a 30 cm, los Enchytraeidae tuvieron la mayor abundancia (1 146 ind.), seguido de Collembola y Acarida (Fig. 13).

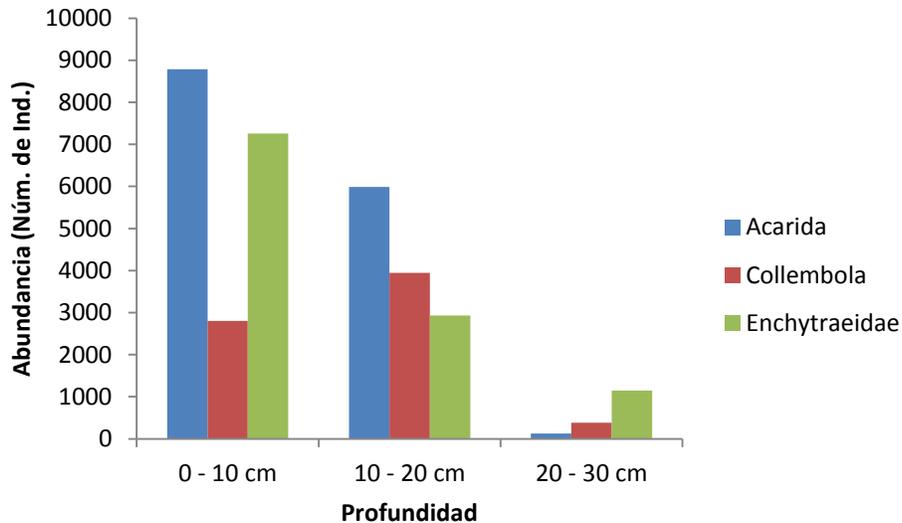


Figura 13 Abundancia por profundidad del suelo, de los taxa de mesofauna, en el bosque de oyamel.

La abundancia de los ácaros y enquitreidos disminuye conforme aumenta la profundidad, mientras que para los colémbolos no se observa este patrón. Se encontraron diferencias significativas ($\chi^2 = 2627.3$, $p \leq 0.001$) en la distribución de todos los taxa a diferentes profundidades.

7.1.4 Variación por grupo

7.1.4.1 Acarida

Los ácaros se distribuyen principalmente en el piso más alto y en menor medida en el piso altitudinal medio. Este grupo es el único que se encontró preferentemente y con mayor abundancia en la temporada seca; la mayor abundancia se encontró de 0-10 cm y disminuyó conforme la profundidad llega a los 30 cm.

En la mayor profundidad (20-30 cm), únicamente se encontraron organismos en la mayor altitud y durante la temporada de secas. También se destaca que en la temporada húmeda, conforme aumenta la altitud, la abundancia en la profundidad de 10-20 cm también aumentó (Fig. 14).

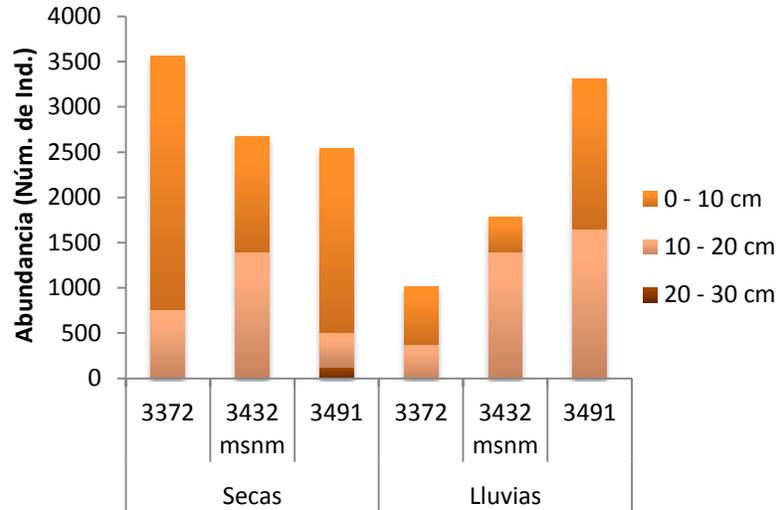


Figura 14. Distribución de la abundancia de Acarida por profundidad y altitud en dos temporadas del año 2009.

Durante la temporada de lluvia la mayor abundancia se observó en el piso altitudinal más alto, disminuyendo en relación a la altitud con 3 310, 1 758 y 1 019 ind. Este patrón se ve invertido en la temporada seca, cuando a mayor altitud se observó la menor abundancia de ácaros (Fig. 15).

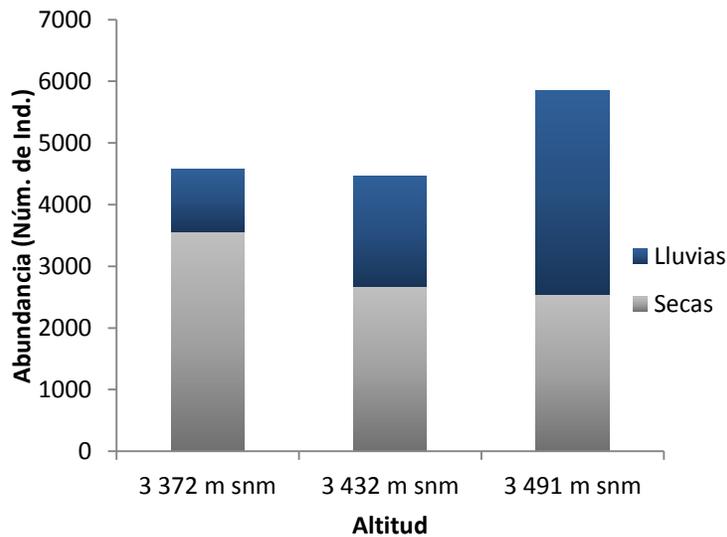


Figura 15. Abundancia de ácaros edáficos en dos temporadas del año 2009.

El análisis de varianza (ANOVA) mostró diferencias significativas, para este grupo en la profundidad ($F_{(2,72)} = 37.02$, $p \leq 0.0001$), siendo la de 20-30 cm la profundidad en la que se registró menor abundancia, (Fig. 16).

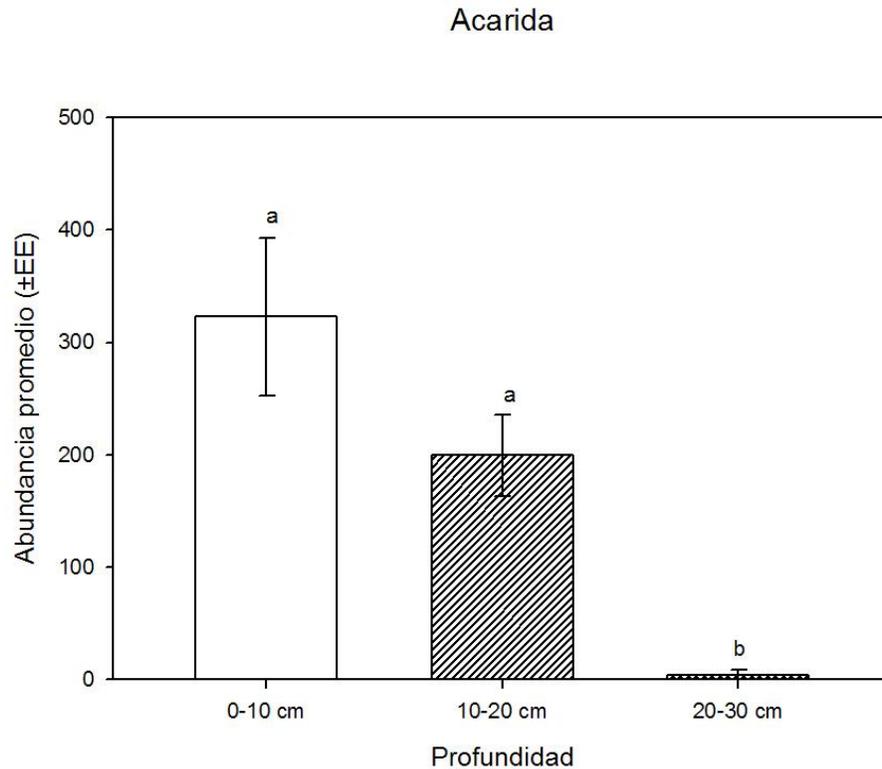


Figura 16. Distribución de los ácaros en tres profundidades del bosque de oyamel. Letras diferentes denotan diferencias significativas para la profundidad de acuerdo a la prueba *post hoc* de Tukey ($p < 0.05$).

La interacción Temporada-Altitud fue significativa ($F_{(2,72)} = 3.35$, $p \leq 0.0407$) ya que en la zona más baja se tiene la mayor abundancia durante la temporada seca y la menor en la temporada de lluvia (Fig. 17).

Este grupo de la mesofauna se encuentra mayoritariamente donde otros grupos no se presentan en el bosque de oyamel.

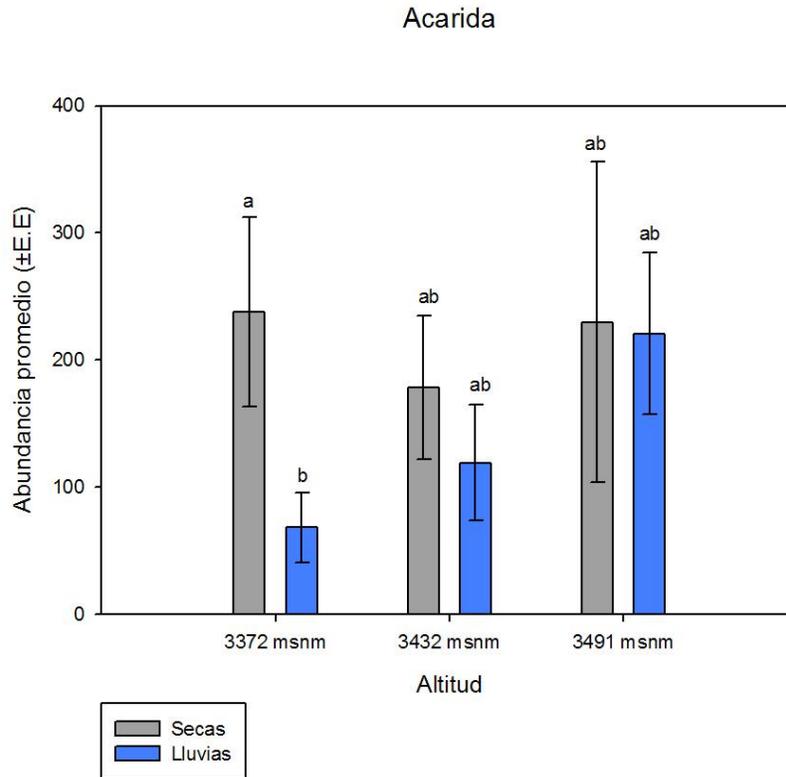


Figura 17. Abundancia de ácaros en tres pisos altitudinales del bosque de oyamel, durante las temporadas del año. Letras diferentes denotan diferencias significativas para la interacción Temporada-Altitud de acuerdo a la prueba LSD de Fisher ($p < 0.05$).

La interacción Temporada-Altitud en los pisos medio y más alto son significativamente diferentes al piso altitudinal más bajo. Dado que las diferencias fueron marginalmente significativas se aplicó la prueba de comparación de grupos LSD según Fisher ($p < 0.05$).

La interacción Temporada-Profundidad mostró diferencias significativas ($F_{(2,72)} = 3.63$, $p = 0.0315$) en esta relación (Fig. 18).

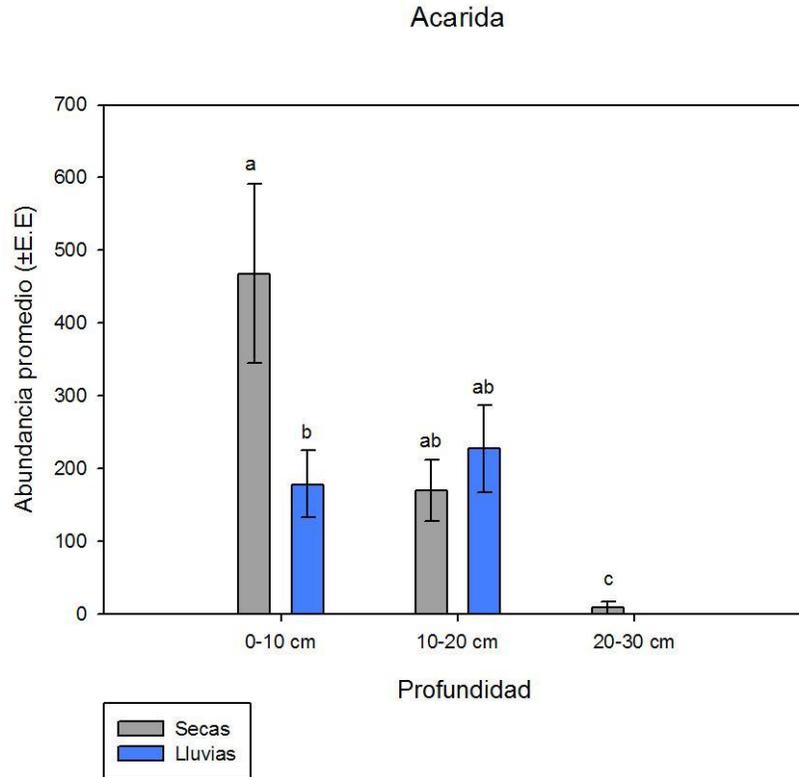


Figura 18. Distribución vertical de los ácaros en el suelo del bosque de oyamel, en dos temporadas del año. La profundidad de 20-30 cm en temporada de lluvias (c) no se muestra debido a la escala. Letras diferentes denotan diferencias significativas en esta interacción de acuerdo a la prueba *post hoc* de Tukey ($p < 0.05$).

En la temporada seca la abundancia disminuye conforme aumenta la profundidad, siendo la de 0-10 cm la que tiene el mayor número de individuos, mientras que en la temporada de lluvias la abundancia aumenta de 0-10 y de 10-20 cm, pero no de 20-30 cm.

La interacción Altitud-Profundidad resultó significativamente diferente ($F_{(4,72)} = 3.55$, $p \leq 0.01$). La menor abundancia promedio se encontró en la mayor profundidad de todos los pisos altitudinales (Fig. 19).

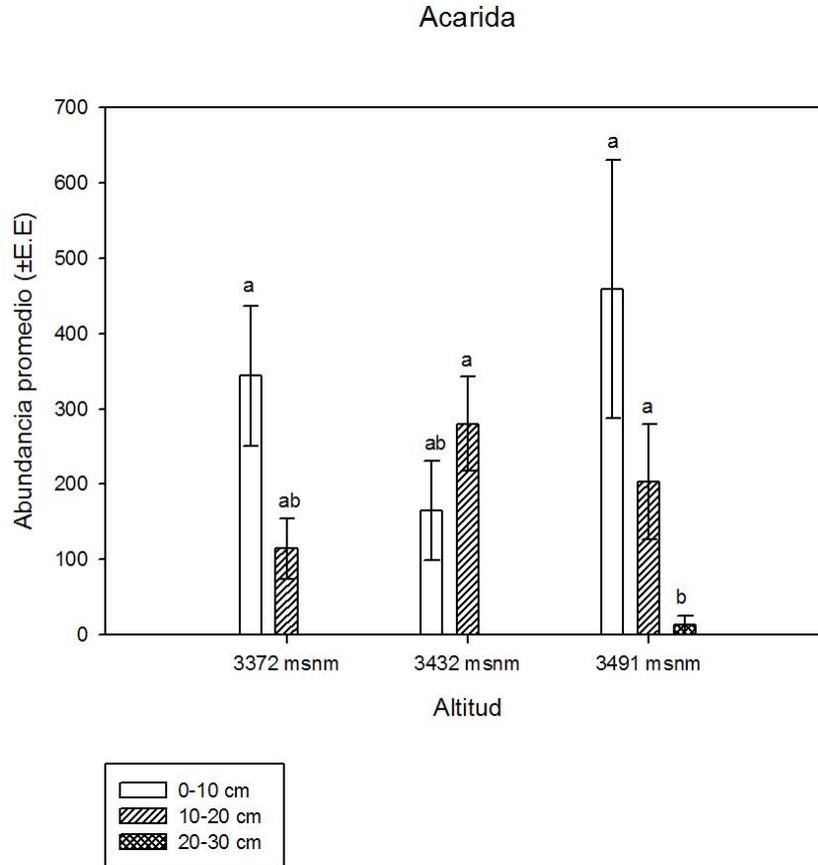


Figura 19. Abundancia de los ácaros de acuerdo a la Altitud-Profundidad en el suelo del bosque de oyamel. La profundidad de 20-30 cm (b) en los pisos altitudinales más bajos no se muestra debido a la escala. Letras diferentes denotan diferencias significativas, en esta interacción, de acuerdo a la prueba *post hoc* de Tukey ($p < 0.05$).

No se encontraron diferencias significativas en la temporada, la altitud ni en la interacción Temporada-Altitud-Profundidad.

7.1.4.2 Collembola

Los colémbolos tuvieron el valor más alto de abundancia a mayor altitud, disminuyendo hacia el piso altitudinal más bajo. Del mismo modo mostraron una relación con la humedad pues el 72.7 % se encontraron en la temporada de lluvias. En cuanto a la profundidad, en general la mayoría se registraron en el estrato de 10-20 cm (Fig. 20).

La mayor abundancia se encontró en el piso altitudinal más alto, durante la temporada de lluvias y en la capa superficial del suelo de 0-10 cm.

En el piso altitudinal más bajo, durante la temporada seca no se encontraron organismos de este grupo. Mientras que en la altitud media, en la temporada seca no se les encontró de 0 a 10 cm. Del mismo modo en el piso más alto, en ambas temporadas, no se les registró en estrato más profundo de 20-30 cm (Fig. 20).

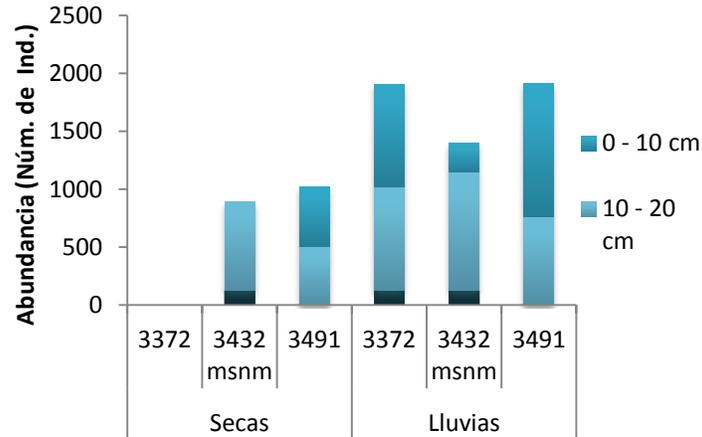


Figura 20. Abundancia de Colembolla por profundidad y altitud en dos temporadas del año 2009.

Para los colémbolos el ANOVA indicó diferencias significativas ($F_{(1,72)} = 8.71, p \leq 0.004$) entre la temporada de secas y lluvias (Fig. 21).

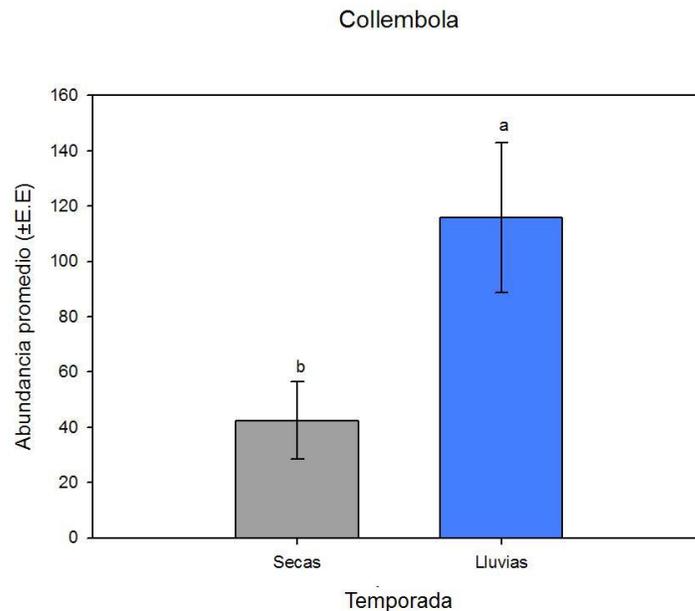


Figura 21. Abundancia de colémbolos edáficos del bosque de oyamel en dos temporadas del año. Letras diferentes denotan diferencias significativas de acuerdo a la prueba *post hoc* de Tukey ($p < 0.05$).

Durante la temporada seca se tienen varios registros en los monolitos donde no se encontraron organismos, por el contrario en la temporada de lluvias únicamente en la mayor profundidad no se registraron.

La distribución vertical de los colémbolos también muestra una asociación con las profundidades, pues se encontraron diferencias significativas en la abundancia ($F_{(2, 72)} = 7.98$, $p \leq 0.0007$) entre las capas superficiales del suelo y la más profunda (Fig. 22); en relación con la altitud no se encontraron diferencias significativas.

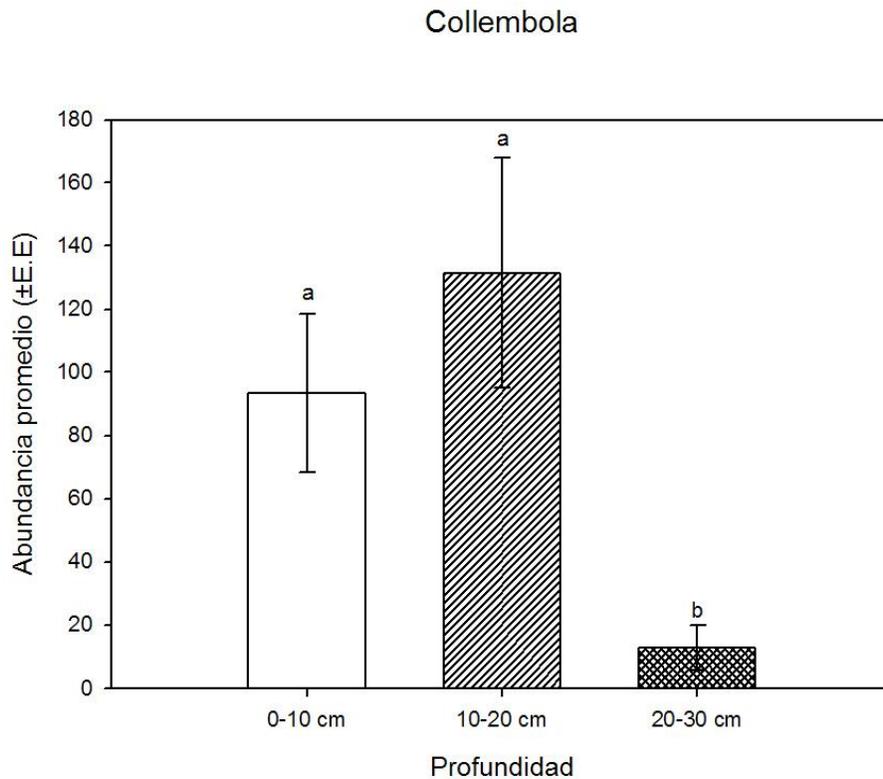


Figura 22. Abundancia de los colémbolos en el suelo del bosque de oyamel. Letras diferentes denotan diferencias significativas de acuerdo a la prueba *post hoc* de Tukey ($p < 0.05$).

7.1.4.3 Enchytraeidae

El factor altitudinal no mostró diferencias estadísticamente significativas. En cambio el ANOVA mostró diferencias significativas ($F_{(1,72)}= 34.71$, $p \leq 0.0001$) entre las temporadas del año, lo que sugiere un efecto de la humedad en los enquitreidos (Fig. 23).

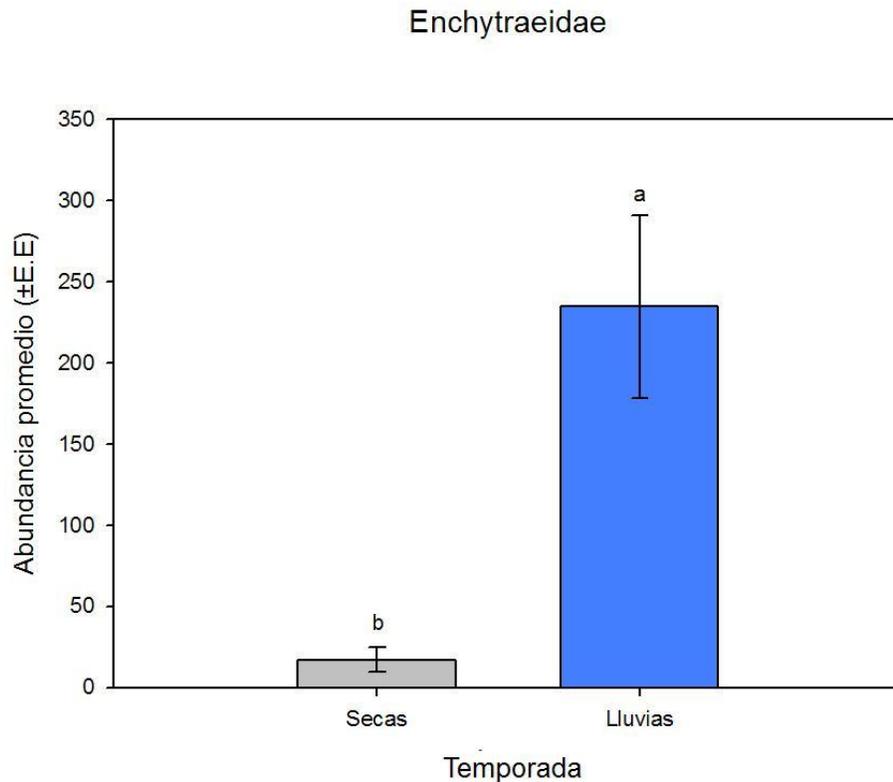


Figura 23. Distribución de los enquitreidos en dos temporadas del año, el suelo del bosque de oyamel. Letras diferentes denotan diferencias significativas de acuerdo a la prueba *post hoc* de Tukey ($p < 0.05$).

La abundancia promedio en este grupo disminuyó significativamente ($F_{(2,72)}=6.47$, $p \leq 0.0026$) a medida que se incrementa la profundidad, por lo que se encontraron asociados al estrato más superficial del suelo (Fig. 24).

Enchytraeidae

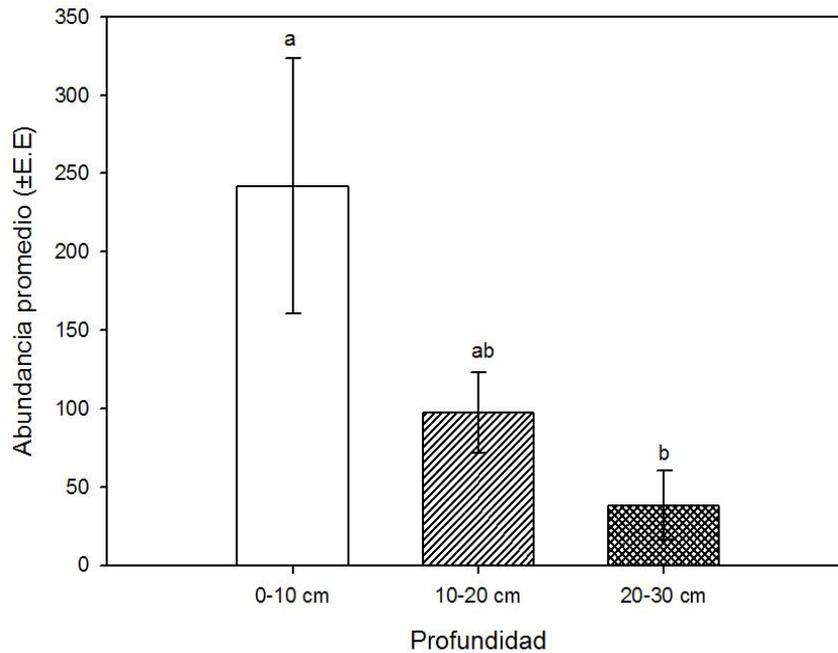


Figura 24. Distribución vertical de los enquitreidos en el suelo del bosque de oyamel. Letras diferentes denotan diferencias significativas en la profundidad de acuerdo a la prueba *post hoc* de Tukey ($p < 0.05$).

El ANOVA mostró que la interacción Temporada-Profundidad fue significativa ($F_{(2,72)} = 8.75$, $p \leq 0.0004$). Los enquitreidos se encuentran asociados a la humedad del suelo y se mantienen en los estratos más superficiales y su presencia está limitada por la temporada de secas, por lo que la mayor abundancia promedio se encontró en la temporada de lluvias y descendió a medida que se incrementó la profundidad (Fig. 25).

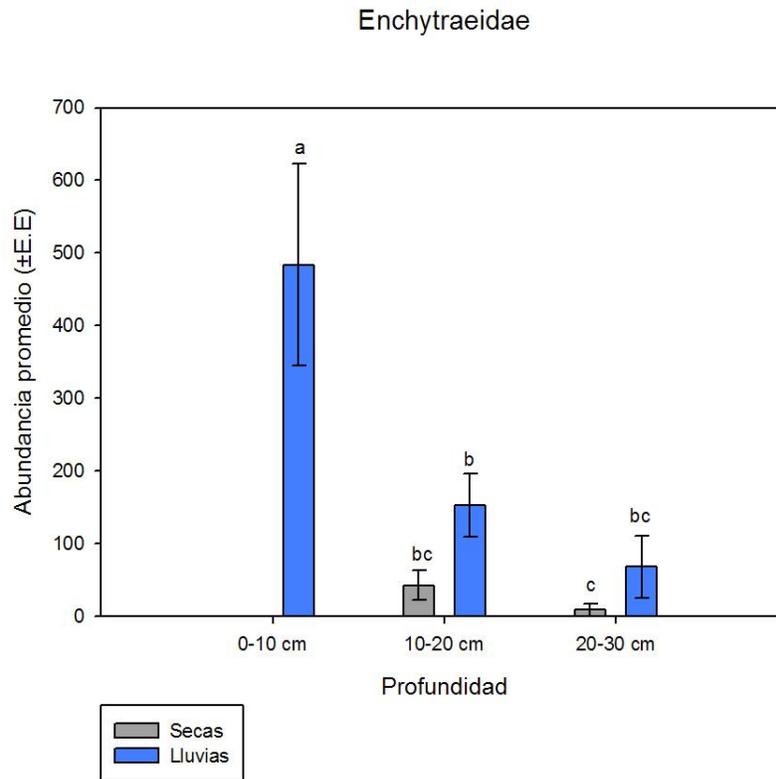


Figura 25. Abundancia de los enquitreidos edáficos del bosque de oyamel, en dos temporadas del año. En la profundidad de 0-10 cm la temporada seca (c) no se muestra debido a la escala. Letras diferentes denotan diferencias significativas de acuerdo a la prueba *post hoc* de Tukey ($p < 0.05$).

La altitud y el resto de las interacciones no mostraron diferencias estadísticamente significativas.

7.2 MACROFAUNA

La abundancia total fue de 1 905 individuos (ind.) de los que corresponden 745 a Oligochaeta, 365 a Larvas, 291 a Homoptera, 134 a Coleoptera, 122 a Diptera, 114 a Chilopoda, 37 a Araneae, 33 a Heteroptera, 24 a Diplura, 21 a Diplopoda, 9 a Psocoptera, 7 a Hymenoptera, 1 a Blattodea, 1 a Opiliones y 1 a Siphonaptera (Fig. 26).

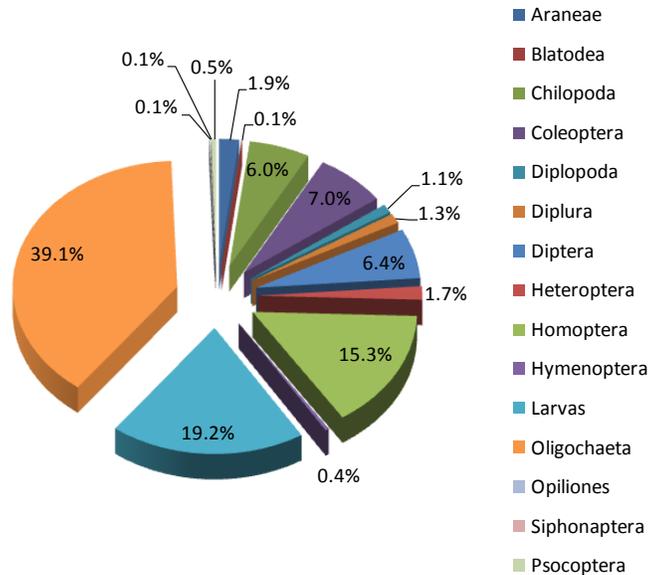


Figura 26. Proporción de los 15 grupos de macrofauna en el suelo del bosque de oyamel en la CRM.

Los taxones mencionados anteriormente; cuya abundancia fue menor a diez individuos, son los referidos en las gráficas siguientes donde aparecen “otros”.

7.2.1 Variación altitudinal

La mayor abundancia se encontró a los 3 432 m s. n. m. (Fig. 27), donde se observaron 51.4 % de los organismos, seguido de la zona baja y el piso más alto con 25.4 % y 23.3 % de los individuos, respectivamente. Estas diferencias en la distribución altitudinal de toda la macrofauna fueron significativas ($X^2= 988.2$, $p \leq 0.001$).

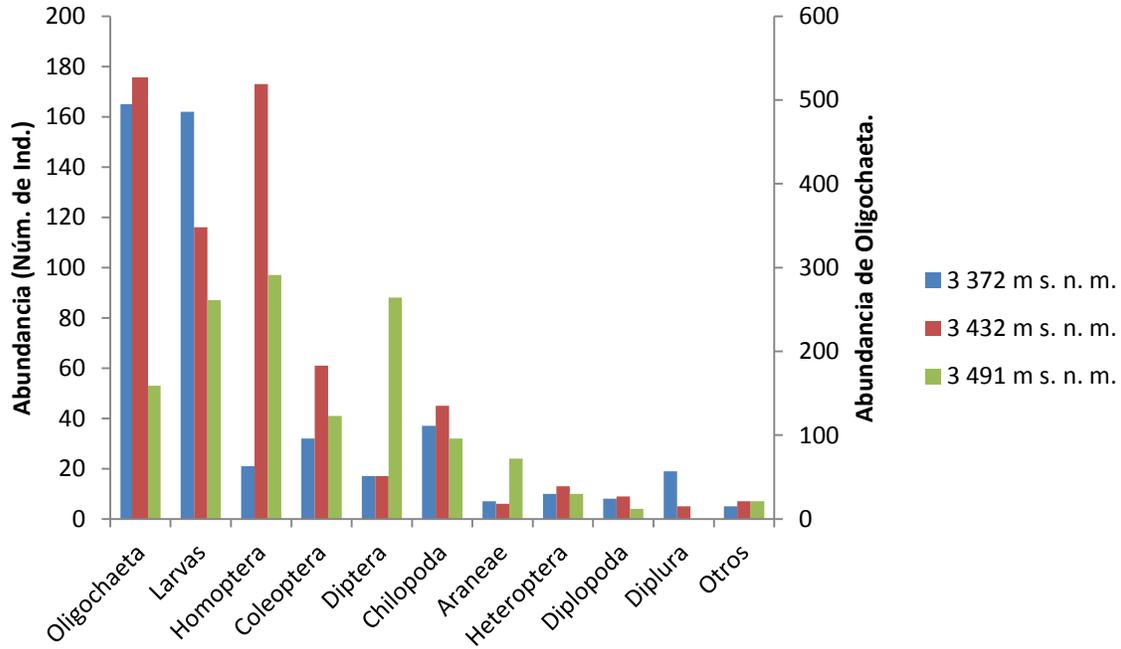


Figura 27. Abundancia de los grupos de macrofauna en tres altitudes del bosque de oyamel en la CRM. En el eje secundario se muestra la abundancia (Núm. de Ind.) de Oligochaeta en el piso altitudinal medio (3 432 m s. n. m.).

Como se observa en el eje secundario de la figura 27, la mayor abundancia en el piso altitudinal medio está determinada por un grupo, que son las lombrices de tierra.

7.2.2 Variación por temporada

El 56% de los organismos se registraron en la temporada de secas, mientras que el resto se encontraron en la de lluvias, con un grupo dominante (Oligochaeta; Fig. 28).

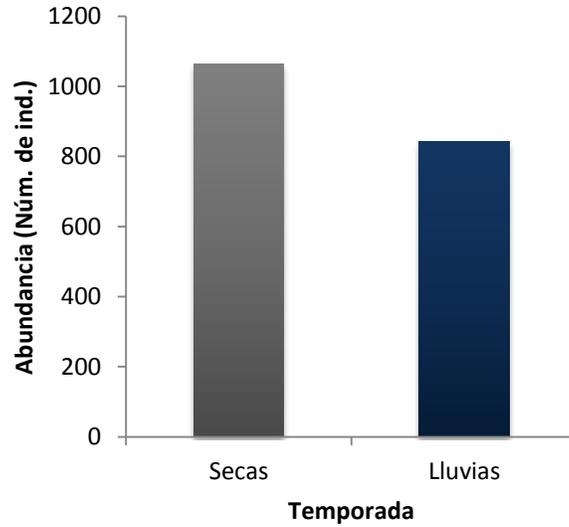


Figura 28. Distribución temporal de la macrofauna del suelo en el año 2009.

Particularmente los taxa Araneae, Diptera, Hymenoptera, Psocoptera y las Larvas fueron más abundantes durante la temporada de secas. De todos los organismos de la temporada de lluvias, el 48 % correspondió a Oligochaeta (Fig. 29).

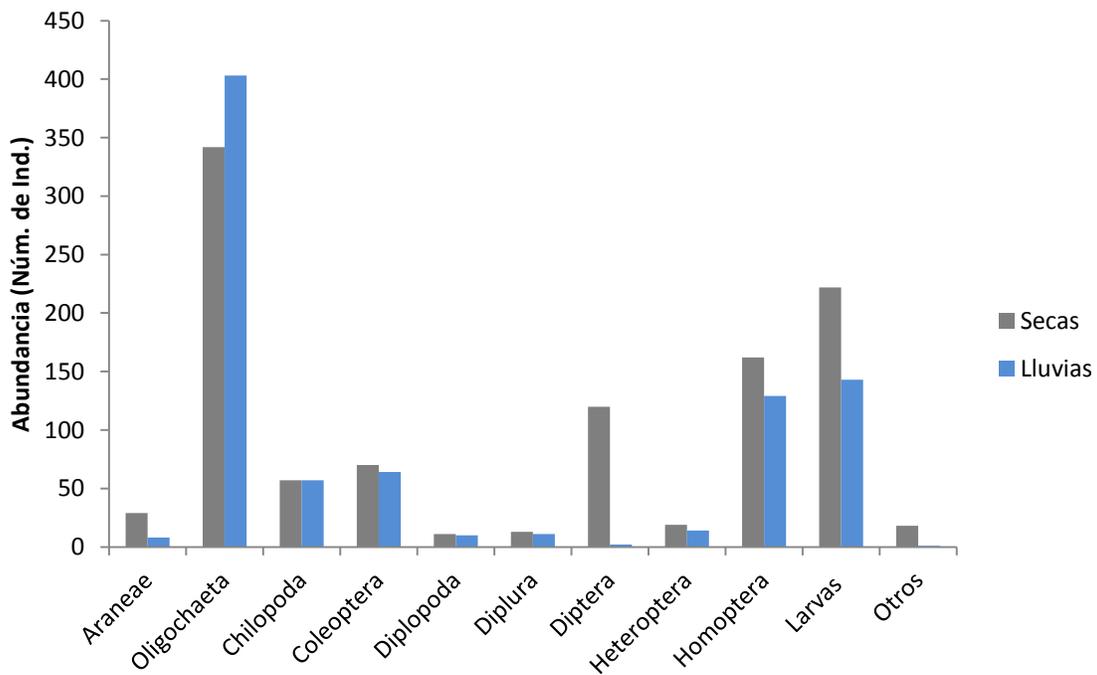


Figura 29. Abundancia de los grupos de macrofauna en las dos temporadas del 2009.

No se encontraron diferencias significativas entre los grupos para las temporadas del año. Sin embargo las lombrices de tierra, además de ser más abundantes en la temporada de lluvias, superan al conjunto del resto de los grupos observados en esta temporada.

7.2.3 Variación en la profundidad

En general, la distribución vertical de la macrofauna en el suelo presentó el patrón de mayor abundancia en el estrato más superficial y menor abundancia en lo más profundo (Fig. 30).

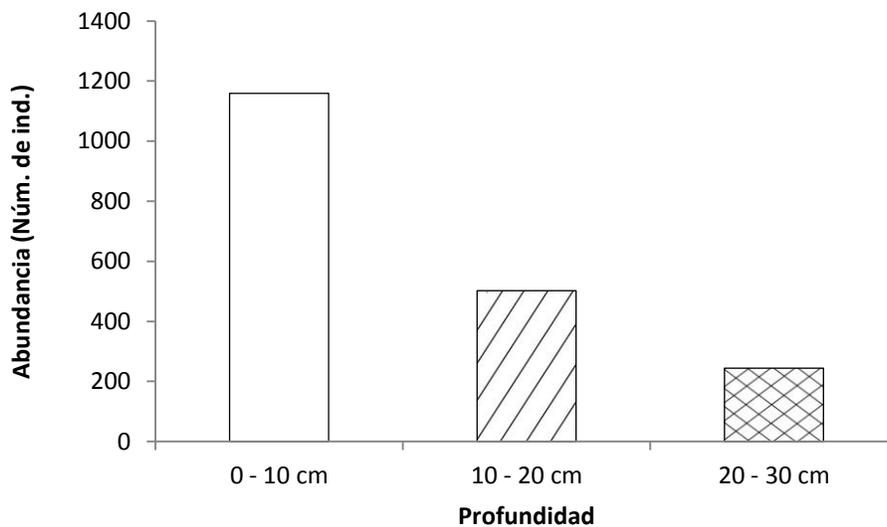


Figura 30. Distribución vertical del la macrofauna en el suelo del bosque de oyamel.

En la capa de suelo inmediata a la superficie (0-10 cm) se observó la mayor abundancia; ésta se compone principalmente por lombrices con 501 ind. seguidas por las larvas, los homópteros y los coleópteros. En la profundidad media (10-20 cm) los grupos más abundantes fueron Oligochaeta, Homoptera, Larvas y Diptera (Fig. 31).

En la capa más profunda (20-30 cm) los grupos más abundantes fueron Oligochaeta, las Larvas, Diptera y Chilopoda (Fig. 31). La prueba de X^2 mostró diferencias significativas en la abundancia de toda la macrofauna con la profundidad ($X^2 = 11088.4$, $p \leq 0.001$).

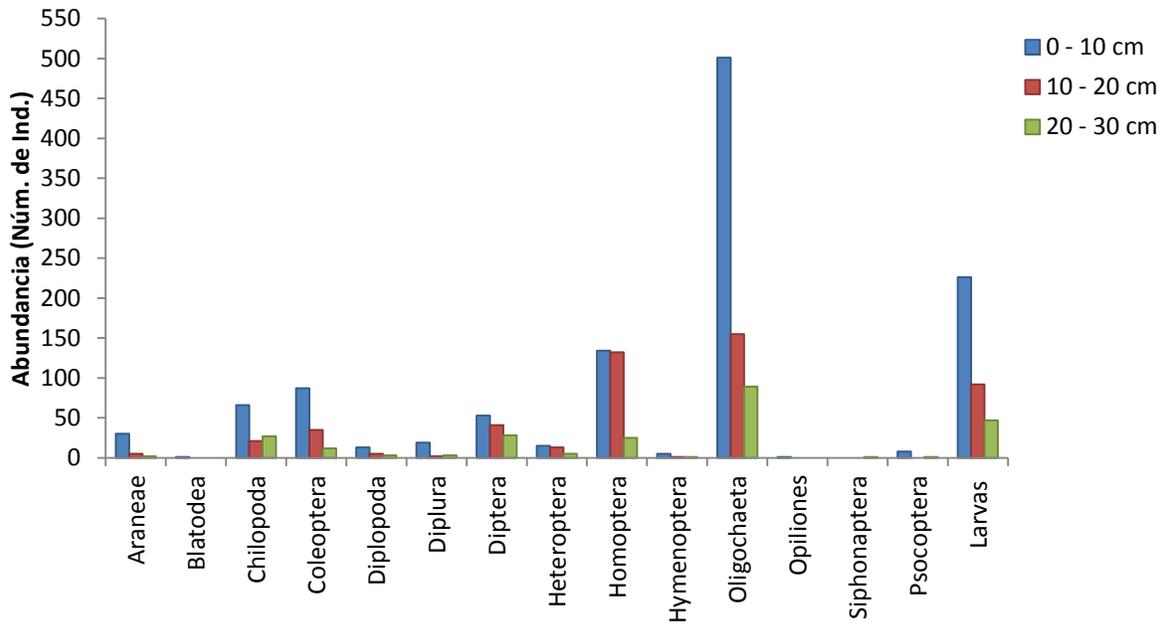


Figura 31. Abundancia por profundidad del suelo de los grupos de macrofauna del bosque de oyamel en la CRM.

El patrón general muestra que la abundancia disminuyó conforme aumentó a la profundidad.

7.2.4 Variación por grupo

Raros

Los grupos en los que se encontró sólo un individuo se determinaron como raros y en ocasiones se agruparon como “otros”. Se encontró un organismo de Blattodea en el piso altitudinal más bajo, en la temporada seca a una profundidad de 0-10 cm. En la zona más alta se encontró un individuo del grupo de los Opiliones, en la temporada de lluvias pero a la misma profundidad que el de Blattodea (0-10 cm). También en el piso más alto, pero en la temporada de secas se encontró un Siphonaptera, este caso en la profundidad de 20-30 cm.

Araneae

Por lo que se refiere a las arañas, 24 ind. se registraron en la mayor altitud (65 %), con la mayor abundancia (78.4 %) que se encontró en la temporada seca. La abundancia fue significativamente distinta entre la temporada de secas y lluvias ($t_{(0.05, 88)} = 2.15, p \leq 0.03$).

Las arañas se registraron principalmente (81 %) en la capa superficial del suelo de 0-10 cm de profundidad. Se observó una disminución con el aumento en la profundidad, registrándose la menor abundancia de 20-30 cm, en la temporada de lluvias. Este grupo constituyó casi el 2 % de la abundancia total de la macrofauna.

Chilopoda

La mayor abundancia de ciempiés se presentó en el piso altitudinal medio a 3 432 m s. n. m. con 45 ind., seguida de la zona más baja y de la más alta con 37 y 32 ind., respectivamente. La abundancia fue de 57 ind. en las dos temporadas de año. La mayor abundancia ocurrió en el estrato inmediato a la superficie del suelo donde se encontraron 66 ind. (57.9 %), seguido de la mayor profundidad y la profundidad media. Este grupo tuvo al 6 % de la abundancia total de los taxa de la macrofauna.

Coleoptera

Los escarabajos se encontraron principalmente a 3 432 m s. n. m. con 61 organismos. En la temporada seca se encontró la mayor abundancia (52 %). Igualmente se encontró la mayor abundancia de 0-10 cm de profundidad. La abundancia descendió así de 64.9 % en la capa superficial, hasta 9 % en la parte más profunda. Los escarabajos constituyeron el 7 % de la macrofauna.

Diplopoda

La mayor abundancia de milpiés ocurrió en los 3 432 m s. n. m. y la menor, en la zona de 3 491 m s. n. m. con 43 y 19 %, respectivamente. Estos organismos se encontraron en la misma proporción en ambas temporadas del año. La abundancia descendió a medida que la profundidad aumenta (62 % a 14 %). Los milpiés aportaron el 1.1 % de los organismos encontrados en la macrofauna.

Diplura

Los dipluros se encontraron preferentemente en la altitud de 3 372 m s. n. m. (79 %). La mayor abundancia también se presentó en ambas temporadas del año, de 0-10 cm de profundidad. Este grupo constituyó el 1.3 % de la macrofauna.

Diptera

Los moscos se distribuyeron preferentemente en la zona más alta con 88 ind. Por otro lado, mostraron una disminución a medida que se aumenta la profundidad: de 43.4 % a 23.4 %. Así mismo fueron mucho más abundantes durante la temporada seca.

El 6.4 % de la macrofauna correspondió a estos organismos. Se encontraron diferencias significativas entre la temporada de secas y lluvias ($t_{(0.05, 88)} = 5.17, p \leq 0.0001$).

Heteroptera

Las chinches heterópteras fueron más abundantes a 3 432 m s. n. m. En la temporada seca se encontró la mayor abundancia (57.6 %) y en el estrato de 0-10 cm. En la macrofauna el 1.7 % de los organismos correspondieron a este grupo.

Homoptera

Los homópteros fueron más abundantes en la altitud de 3 432 m s. n. m. Y durante la temporada seca (55.7 %). Se distribuyeron preferentemente en los estratos de 0-10 y de 20-30 cm con 46 % y 45.4 %, respectivamente. Este grupo es el tercero más abundante de la macrofauna, ya que constituyó el 15.3 % de esta.

Hymenoptera

Los himenópteros edáficos, en este caso avispas, se encontraron por igual en la zona más alta y más baja (43 % en cada una). Este grupo sólo se registró en la temporada seca. En la profundidad de 0-10 cm se observó el 71.4 % de ellas. Las avispas constituyeron sólo el 0.4 % de la macrofauna estudiada.

Oligochaeta

Las lombrices de tierra fueron el grupo más abundante de la macrofauna: se encontraron 527 ind. a 3 432 m s. n. m. seguido de una abundancia de 165 y 53 ind. a 3 372 y 3 491 m s. n. m., respectivamente. El 54 % de estos organismos se encontraron en la temporada de lluvias. Fueron las más abundantes en las tres profundidades y se registró un descenso en la abundancia al aumentar la profundidad. Las lombrices de tierra conformaron el 39.1 % de la macrofauna y llegando a ser 48 % del total durante la temporada húmeda.

Psocopetera

El 67 % de estos organismos se registró en el piso altitudinal medio y sólo se observaron durante la temporada seca. Los psocópteros se encontraron preferentemente de 0-10 cm. Los psocópteros constituyeron el 0.47 % de la macrofauna.

Larvas

Este grupo fue el segundo más abundante de la macrofauna y disminuyó al aumentar la altitud; la mayor abundancia se observó durante la temporada seca (60.8 %). La abundancia también fue mayor en la capa superficial del suelo y disminuyó con la profundidad (62 % de 0-10 cm, hasta 13 % de 20-30 cm). Las Larvas constituyen el 19.2 % a la abundancia total de la macrofauna y hasta un 20 % de la que se registró para la temporada seca.

7.2.5 Análisis Multivariado

La agrupación jerárquica de la macrofauna permitió identificar y aglomerar cuatro grupos bien definidos en el dendrograma con un valor explicativo del 50 % (Fig. 32). El primero (corchete verde) se caracterizó por contener los sitios del piso altitudinal más bajo, independientemente de la temporada del año (Cuadro 4). Los grupos que caracterizaron sus intervalos fueron los de mayor abundancia: Oligochaeta, Larvas y Chilopoda.

El segundo agrupamiento, que se encontró unido con el anterior pero se distinguió claramente (corchete azul) sólo contuvo a la altitud media y alta, independientemente de la profundidad y de la temporada. El grupo que lo caracterizó fue el de las chinches Heteroptera, además de los más abundantes mencionados con el agrupamiento anterior (Figura 32).

El tercer agrupamiento que se reconoció fue de la temporada seca (corchete amarillo), en el piso más alto y se definió por los Hymenoptera, Psocoptera y Siphonaptera, exclusivos de ésta temporada. Por último se observa que este agrupamiento se separó desde el primer nivel (corchete rojo), ya que tuvo a los grupos con los sitios de mayor abundancia, en la altitud media y principalmente en la menor profundidad del suelo (Fig. 32).

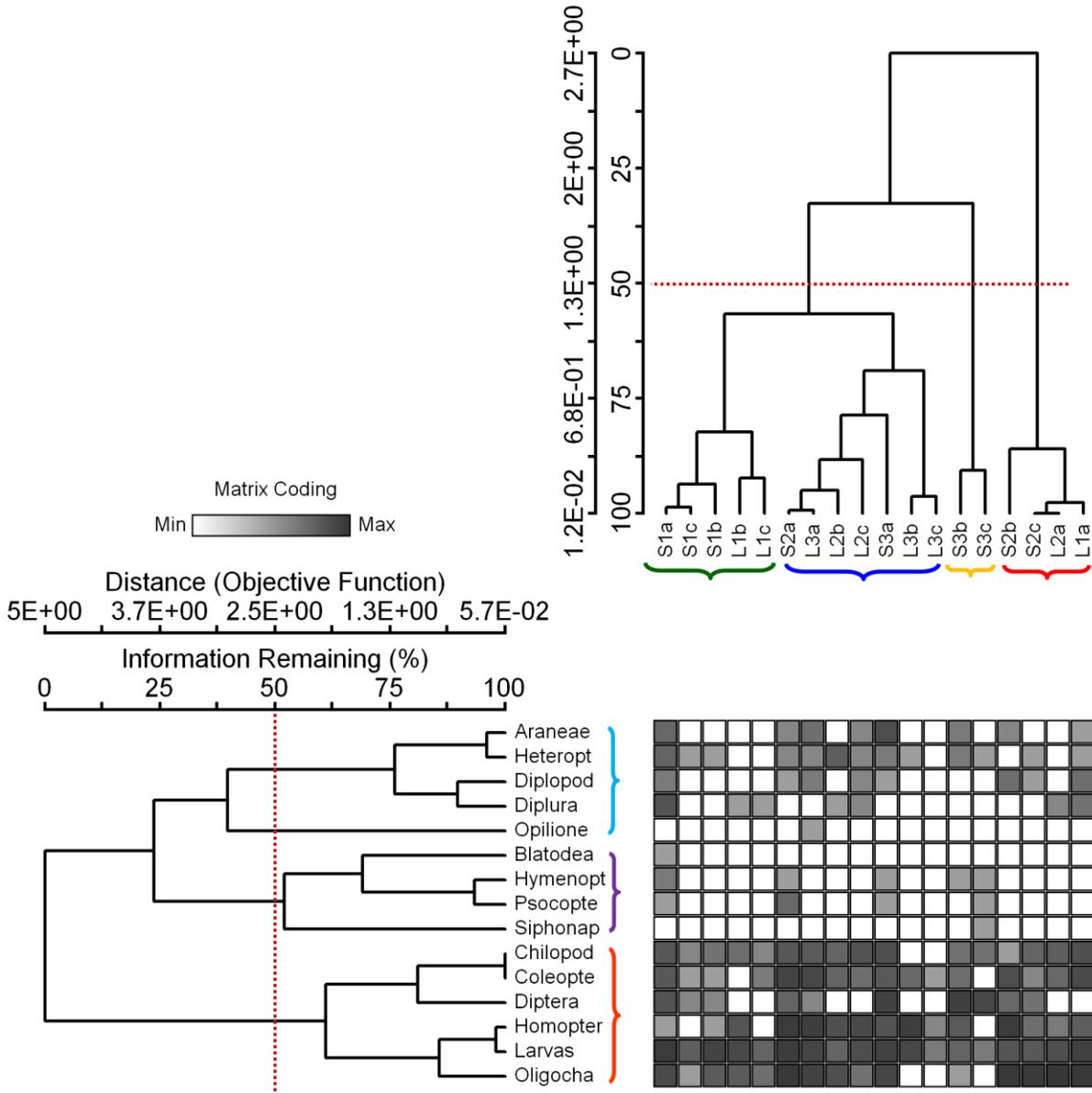


Figura 32. Clasificación jerárquica mediante el algoritmo de Ward y la medida de distancia de Sorensen. La línea punteada tiene el 50 % de explicación en los grupos y los sitios. Las letras y números corresponden a: S- Secas, L- Lluvias; 1- 3 372, 2- 3 432, 3- 3 491 m s. n. m.; a- 0 a 10 cm, b- 10 a 20 cm y c- 20 a 30 cm. La escala de grises denota grupos de intervalos de acuerdo a la abundancia de los grupos (blanco a gris, de menor a mayor). .

En el análisis de clasificación y en la agrupación no se mostró una tendencia determinante de la profundidad en cuando a los sitios y los grupos (Cuadro 4).

Cuadro 4. Características de los agrupamientos jerárquicos del mediante el algoritmo de Ward y la medida de distancia de Sorensen (los colores corresponden a la Fig. 32).

Agrupación	Temporada	Altitud (m s. n. m.)	Profundidad (cm)	Grupo
S1a, S1c, S1b, L1b, L1c.	Secas y Lluvias	3 372	0 a 30	Homoptera
S2a, L3a, L2b, L2c, S3a, L3b, L3c.	Secas y Lluvias	3 432 a 3491	0 a 30	Heteroptera
S3b, S3c.	Secas	3 491	20 a 30	Diptera
S2b, S2c, L2a, L1a.	Secas y Lluvias	3 372 a 3 432	0 a 30	Larvas

Los primeros dos ejes extraídos del análisis de correspondencia (Decorana), explicaron el 40% de la varianza de los datos (Fig. 33).

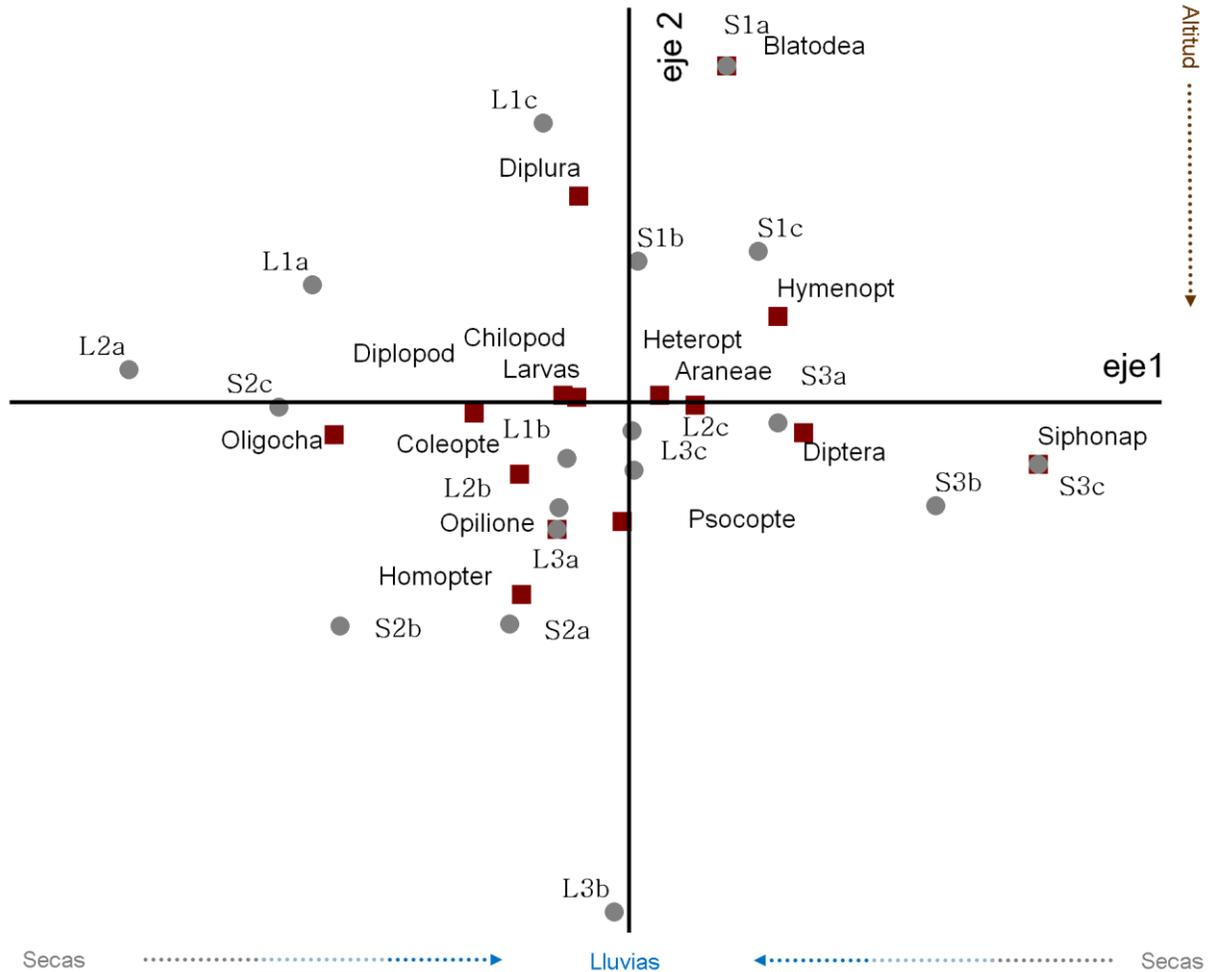


Figura 33. Diagrama del los primeros dos ejes del análisis de correspondencia detendenciado Decorana. El punto representa los sitios y el cuadro los grupos. Las letras y números corresponden a: S- Secas, L- Lluvias; 1- 3 372, 2- 3 432, 3- 3 491 m s. n. m.; a- 0 a 10 cm, b- 10 a 20 cm y c- 20 a 30 cm. Los dos ejes explican el 40 % de la varianza total: eje 1 con 39 % y eje 2 con 0.79 %.

El eje 1 marcó una tendencia en relación con la temporada, ya que en los extremos se encontraron los sitios con grupos característicos de la temporada de secas, mientras que hacia el centro estuvieron los de la temporada de lluvias. Es importante destacar que en el mismo análisis al quitar el peso a los grupos de fauna, se separaron totalmente los sitios de acuerdo a la temporada. El eje 2 mostró una tendencia en la altitud, pues esta aumentó sobre dicho eje a medida que se descendía en el diagrama (Fig. 33). En general la profundidad no fue determinante (Cuadro 4). Concretamente -salvo las tendencias descritas anteriormente- el análisis no permitió agrupar de forma general o definir una de las variables como determinante ante la distribución de los grupos.

8. DISCUSIÓN

8.1 Mesofauna

Los ácaros y colémbolos conforman el mayor porcentaje de la comunidad mesofaunal en bosques templados del país, donde llegan a constituir el 90 % (Cutz-Pool *et al.*, 2008; García, 2009; Ramírez, 2008) o hasta el 95 % en países de Europa (Bardgett y Cook, 1998; Wiwatwitaya y Takeda, 2005). La unión común de estos grupos coincide con lo encontrado en el suelo del bosque de oyamel de la Cuenca del Río Magdalena (CRM), donde ácaros y colémbolos constituyeron la mayor proporción (66 %) de la mesofauna, en este bosque.

Si bien algunos estudios, en suelos argentinos, mencionan que los enquitreidos son un grupo más abundante que los ácaros y colémbolos (López *et al.*, 2005; Gizzi *et al.*, 2009), en estudios de fauna edáfica, generalmente los enquitreidos se tratan independientemente de los artrópodos y no se les considera un conjunto de invertebrados. Aunado a ello, por su conspicuidad y su tamaño variable, en ocasiones los enquitreidos se han considerado -tanto en México como en países de Europa- como macroinvertebrados (Negrete-Yankelevich *et al.*, 2007; Maraldo *et al.*, 2009).

8.1.1 Variación altitudinal

Varios estudios relacionan la altitud con la fauna edáfica (ver Cuadro 2). Se ha visto que en un sistema montañoso del Tíbet la abundancia de los artrópodos disminuyó con la altitud, excepto en el caso de los colémbolos (Jing *et al.*, 2005). Es importante resaltar que aunque en nuestro estudio el intervalo altitudinal es menor, los resultados obtenidos en el gradiente de las montañas orientales coinciden con lo encontrado en el suelo del bosque de oyamel de la CRM; ya que se encontraron diferencias significativas de estos grupos en relación con la altitud.

El estudio de Ramírez (2008) se realizó en varios bosques templados de México, distribuidos en diferentes altitudes (ver Cuadro 2), encontrándose que más del 75 % de la fauna edáfica fueron ácaros y colémbolos. A su vez, las diferencias en la vegetación de estos bosques templados -cuya distribución se relaciona con la altitud- también tuvieron relación con la abundancia de la fauna edáfica.

Específicamente en la CRM, el estudio de Baltazar (2011) en el bosque de oyamel mostró ser el tipo de bosque con la menor abundancia faunística (respecto pino y encino) y con la menor diversidad de grupos. Lo anterior contrasta con el estudio de Ramírez (2008), en el que la abundancia de estos invertebrados fue mayor en suelos bajo bosque de oyamel (respecto a los de pino).

Es decir, a pesar de que la diversidad de grupos fuera menor, la abundancia de estos grupos de mesofauna fue mayor en los bosques de oyamel. Si bien el estudio de Baltazar (2011) se refiere a la fauna del mantillo, es importante destacar que, en la altitud del bosque de oyamel de la CRM, la baja diversidad se atribuyó principalmente a las bajas temperaturas del suelo y del aire.

Otros factores abióticos como el pH, la temperatura, la humedad y la concentración de CO₂ pueden ser determinantes para la distribución de algunos invertebrados, como los analizados por García (2009) en diferentes pisos altitudinales del volcán Iztaccíhuatl (ver Cuadro 2). En nuestro estudio, la altitud produjo diferencias significativas en la distribución de los grupos, en particular los colémbolos quienes mostraron el mismo comportamiento que en el estudio de García (2009). En uno de los pisos altitudinales en el Iztaccíhuatl (con vegetación predominante de *Abies religiosa*, a 3 250 metros de altitud) se encontraron especies de colémbolos exclusivas de ese piso; además, se reportó que la altitud aunada al CO₂ -que disminuye al aumentar la altitud- es responsable de la abundancia y diversidad de colémbolos en bosques templados similares.

Es probable que el aumento en la abundancia de colémbolos se relacione con la disminución de otros grupos, como los ácaros, dentro de los cuales puede haber ciertos depredadores (Coleman *et al.*, 2004) y estos limiten su distribución en función del incremento en la altitud (Jing *et al.*, 2005); el aumento de la abundancia de colémbolos con respecto a la altitud -encontrada en nuestro estudio- apoya lo anterior.

En nuestro estudio se observó que la abundancia de los colémbolos aumentó de la zona más baja a la más alta, lo cual coincidió con lo encontrado por Cutz-Pool *et al.* (2010), quienes a 3 440 m (bosque de pino y oyamel) observaron que los colémbolos y en general los invertebrados registraron su máxima abundancia relativa.

En nuestro estudio, en el bosque de oyamel de la CRM, también los ácaros se distribuyeron preferentemente en el piso más alto, aunque la proporción en las distintas altitudes es similar. Baltazar (2011) también encontró que la mayor abundancia de invertebrados correspondía a los ácaros del bosque de oyamel (respecto a otros tipos de bosque en la misma cuenca), sin embargo, este tipo de vegetación en la cuenca corresponde a una altitud intermedia (ver Cuadro 2). Cutz-Pool *et al.* (2010) destacan que, en el Iztaccíhuatl, al analizar los grupos aisladamente se observa una relación entre altitud y abundancia, como lo confirman los resultados de Baltazar (2011) para el mantillo y nuestro estudio en el suelo de la CRM.

A diferencia de los otros grupos de mesofauna, en el bosque de oyamel de la CRM la abundancia de los Enchytraeidae fue mayor a menor altitud y disminuyó al aumentar la altitud, lo cual corresponde a una mayor temperatura en el piso más bajo. Condiciones adversas en el suelo, como las temperaturas más bajas reportadas por Baltazar (2011) para el suelo del bosque de oyamel de la CRM, pueden explicar la disminución de este grupo. Axelsson *et al.* (1984) también reportan que, en bosques de Europa, hay una relación de la distribución de este grupo con temperaturas más altas en el suelo y condiciones más favorables como la cantidad de humedad y la calidad de la MO en el suelo.

8.1.2 Variación por temporada

En relación con las temporadas del año, se ha estudiado el comportamiento de la fauna edáfica en la temporada seca y húmeda, debido al claro patrón que muestra diferencias entre ambas. Así, los resultados de Wiwatwitaya y Takeda (2005) en bosques de Tailandia coinciden con lo encontrado en el suelo del bosque de oyamel de la CRM, ya que los colémbolos y enquitreidos muestran un cambio estacional marcado, dependiendo de la humedad del suelo: aumentando en la temporada húmeda y disminuyendo en la seca. Sin embargo los ácaros mostraron otro patrón, encontrándose la mayoría en la temporada de secas. En bosques similares García (2009) también reportó una mayor abundancia de colémbolos en la temporada de lluvias que sobrepasó a la de los ácaros. Este patrón puede deberse a las diferencias adaptativas de cada grupo, pues los colémbolos y enquitreidos son

morfológicamente más sensibles a la ausencia de humedad, mientras que los ácaros por su exoesqueleto, pueden resistir condiciones de estrés hídrico en el suelo.

Los enquitreidos mostraron ser dependientes de la humedad, ya que se encontraron casi en su totalidad en la temporada húmeda (93.3 %), seguidos solamente por los colémbolos. La mayor abundancia de enquitreidos, en bosques de Argentina, se ha relacionado con la presencia de una cubierta vegetal estable y con la ausencia de condiciones adversas como cambios bruscos de humedad, temperatura o condiciones de luz (López *et al.*, 2005). Lo anterior podría explicar el hecho de que no encontráramos colémbolos y enquitreidos en la temporada seca en el piso más bajo, donde las temperaturas son más elevadas y la humedad podría verse disminuida.

En nuestro estudio los colémbolos y enquitreidos duplicaron su abundancia durante la temporada de lluvias, con respecto a la temporada de secas, característica que según Brown *et al.* (2004) también comparten otros grupos de invertebrados. Sin embargo, durante la temporada seca los ácaros fueron más abundantes y se encontraron en la capa superficial del suelo en la temporada de lluvias, mientras que los colémbolos y enquitreidos se encontraron a mayor profundidad, donde las variaciones en la humedad y temperatura pudieron ser menos abruptas. Finalmente, la reducción de la competencia con otros grupos, probablemente favoreció que los ácaros aumentaran en la temporada seca (Cutz-Pool *et al.*, 2010).

8.1.3 Variación en la profundidad

Lavelle y Spain (2001) señalan que en la mayoría de los bosques el mantillo se acumula en la superficie del suelo, en estratos relativamente compactos que se encuentran en contacto directo con el suelo, por lo que la superficie constituye una fuente rica en alimento para la fauna edáfica. De la misma manera la disponibilidad de los recursos que provee la MO decrece a mayor profundidad, aunque por otro lado se incrementa su estabilidad, lo que a su vez podría limitar la distribución de algunos organismos.

Las diferencias observadas en nuestro estudio, con respecto a la profundidad pueden obedecer a los patrones encontrados a escalas menores, ya que de acuerdo con Rueda *et al.*

(2011) los patrones en la composición de la mesofauna del suelo suelen tener una estructura espacial a escala pequeña, entre 25 cm y 5 m. Por ello es interesante que la escala de estudio para estos organismos muestre variaciones significativas en la profundidad, en los intervalos de 10 cm, analizados en nuestro estudio.

Además, la calidad del mantillo en el bosque de oyamel favoreció la presencia de invertebrados (Baltazar, 2011), por lo que es probable que al tener una mayor calidad, se favoreciera la abundancia de ácaros; como se observó en nuestro caso en la capa de suelo inmediata a éste (de 0 a 10 cm). Aparte de encontrarse en el mantillo, en un estudio realizado en bosques templados de Bélgica se observó que los ácaros presentan su mayor abundancia y densidad en los primeros 10 cm del suelo (Ducarme *et al.*, 2004).

Los enquitreidos también se han reportado como un grupo abundante de 0 a 10 cm de profundidad (Maraldo *et al.*, 2009) y hasta los 30 cm (López *et al.*, 2005), lo cual coincide con lo encontrado en nuestro trabajo, pues fueron el segundo grupo más abundante a esta profundidad. Dado que el bosque de oyamel presenta una temperatura del suelo baja (Baltazar, 2011; Delgadillo, 2011; Santibáñez-Andrade, 2009) es probable que los enquitreidos encuentren condiciones más favorables para su establecimiento en el estrato más profundo. La abundancia de estos animales, de 20-30 cm de profundidad, supera a la de los ácaros y colémbolos probablemente porque la humedad se mantiene estable y hay menor variación en la temperatura con respecto a la parte más superficial del suelo.

8.1.4 Variación por grupo

Al analizar los grupos de manera independiente, la distribución de los ácaros puede estar relacionada con condiciones de mayor temperatura, pues se encuentran en las capas más superficiales del suelo y en la temporada seca en la que son los más abundantes. El aumento en su abundancia podría estar relacionado con la escasa presencia de otros grupos de mesofauna y su baja capacidad de excavación (Brown *et al.*, 2007; Cutz-Pool *et al.*, 2010). Se reconoce que la distribución no está afectada únicamente por un factor sino por la interacción de todos, ya que aunado a las capas del suelo superficiales, como a la temporada de secas, el efecto de la interacción del piso altitudinal más bajo favorece su presencia, debido a las temperaturas más favorables (Ducarme *et al.*, 2004).

La distribución de los colémbolos está asociada principalmente a la temporada más húmeda y a las capas superficiales del suelo, lo que puede estar relacionado con actividad fragmentadora de este grupo en el mantillo y con la MO que es mayor en las capas superficiales (Doubé y Brown, 1998; Ramírez, 2008; Wiwatwitaya y Takeda, 2005). A pesar de que en otros bosques del país tienen una marcada distribución en relación con la altitud, en este caso no se encontró que fuera un factor que explicase las diferencias significativas en los cambios en abundancia. Probablemente las diferencias aumenten si se amplía el intervalo en la diferencia altitudinal, como podría ser el caso de los estudios de García (2009) y Ramírez (2008) (ver Cuadro 2), aunque en el primer caso las diferencias también podrían estar influidas por ser el mismo sistema montañoso (el Iztaccíhuatl), mientras que en el segundo se trata de varios sistemas (Sierra de Manantlán, Mil Cumbres, Izta-Popo, Zoquiapan y Benito Juárez).

La distribución de los enquitreidos en la profundidad de 0-10 cm y la temporada de lluvias, donde se observaron los valores más altos de abundancia, puede relacionarse con la concentración de la materia orgánica y de la disponibilidad de agua (Maraldo *et al.*, 2009). Esto reafirmaría las diferencias encontradas para el suelo del bosque de oyamel en la CRM, pues la abundancia disminuye a medida que aumenta la profundidad, lo cual puede estar relacionado con la disminución de la MO (Axelsson *et al.*, 1984), mientras que la diferencia en la temporada de lluvias e incluso la interacción con la profundidad, tiene alta relación con la dependencia de este grupo a la humedad (Laiho *et al.*, 2001).

8.2 Macrofauna

El estudio de mantillo de la CRM, realizado por Baltazar en 2011, en los tres tipos de bosque reportó 27 taxones siendo el bosque de oyamel el que tuvo la menor diversidad, con 18 grupos de macrofauna.

Cabe destacar que en nuestro estudio se encontraron 15 grupos de los cuales, Diplura, Diptera y Siphonaptera no se registraron en el estudio de mantillo de la CRM, mientras que Thysanoptera, Gastropoda, Isopoda, Trichoptera y Zygentoma reportados por Baltazar (2011) no fueron observados en nuestro estudio del suelo. De estas diferencias, los grupos encontrados por Baltazar (2011) constituyeron grupos raros (con un individuo cada uno) en

el mantillo o eran preferentemente herbívoros y no excavadores, como lo son los caracoles (Coleman *et al.*, 2004), por lo que la probabilidad de encontrarlos en el suelo, después de los cinco centímetros de profundidad, es mucho menor que en el mantillo (Fragoso y Rojas, 2010).

8.2.1 Variación altitudinal

La mayor abundancia de macrofauna se observó en la altitud media, que resultó significativamente distinta a la más alta y la más baja. Lo anterior nos podría llevar a considerar que las condiciones de temperatura y humedad en el piso altitudinal medio fueron idóneas para la fauna edáfica. Sin embargo, de manera general Lavelle y Spain (2001) señalan que en un gradiente –como es el caso de nuestro estudio- al disminuir la temperatura, la densidad y diversidad de macrofauna también disminuye.

En nuestro estudio la mayor abundancia, fue mayor donde hubo menos grupos. Lo anterior coincidió con los resultados de Ramírez (2008) en el suelo de bosques templados de la Sierra de Manantlán, Mil Cumbres, Izta-Popo, Zoquiapan, Benito Juárez y Anexas. Es decir, por un lado la mayor densidad se relaciona con condiciones de menor temperatura, en la mayor altitud; y por otra parte, sólo algunas taxa están presentes en sitios con circunstancias menos adversas (en cuanto a cambios ambientales se refiere).

En este sentido Lavelle y Spain (2001) refieren a los Oligochaeta que alcanzan la mayor biomasa en el suelo de bosques templados ya que acceden a la amplia gama de recursos del suelo. Así, la actividad de las lombrices y el consecuente decremento de los recursos orgánicos limitan a los otros organismos de la macrofauna. Además de la altitud y la disminución de la temperatura, en el piso altitudinal medio se encontraría una mayor humedad que favoreció a las lombrices. Aunado a ello pudo haber una reducción en la competencia intraespecífica que provocara un aumento en la densidad de las poblaciones (Cutz-Pool *et al.*, 2010; Ramírez, 2008).

Los grupos más abundantes, al aumentar el gradiente altitudinal, fueron las Larvas, Homoptera, Oligochaeta y Coleoptera. Los dos primeros taxa se han registrado como grupos más abundantes en otros estudios al aumentar un gradiente altitudinal en China

(Jing *et al.*, 2005); mientras que los dos últimos grupos se han encontrado como de los más abundantes de la macrofauna en suelos de bosques templados en Jalisco, Colima, Michoacán y Edo. de México (Ramírez, 2008).

En nuestro estudio se encontró a los grupos de Araneae y Diptera que aumentan con la altitud; mientras que los grupos exclusivos de la mayor altitud fueron Siphonaptera y Opiliones, en tanto que Blattodea fue exclusivo de la menor altitud. Si bien los Opiliones se han relacionado con la mayor altitud en el Iztaccíhuatl, grupos como Araneae se relacionan con condiciones más templadas de temperatura en menores altitudes (Cutz-Pool *et al.*, 2010).

8.2.2 Variación por temporada

En relación con los cambios estacionales es claro que hay un patrón diferencial en la temporada de secas y lluvias, pues más de la mitad de la macrofauna se encontró en la temporada seca, a pesar de que esta diferencia, en lo general, no resultó significativa. Este patrón se ha visto en bosques templados de México (García, 2009; Ramírez, 2008; Baltazar, 2011). En comparación, la fauna edáfica de los bosques más húmedos, por ejemplo los de Tailandia (Wiwatwitaya y Takeda, 2005), fue menos abundante que la de los bosques templados. En nuestro estudio se refuerza esta idea con la mayor abundancia de los grupos registrados en la temporada de secas.

Por otro lado Brown *et al.* (2001) ha registrado que al final de la temporada de lluvias (septiembre u octubre en bosques tropicales) es cuando hay mayor densidad poblacional de la macrofauna; sin embargo, el hecho de que esta se constituya principalmente por lombrices provoca un cambio en el registro de la temporada seca.

Debido al comportamiento estacional que tiene la fauna, las variaciones climáticas pueden hacer que algunos miembros de la misma, como las lombrices, se desplacen a profundidades mayores que las contempladas por la metodología de los monolitos - empleada en este trabajo- especialmente durante la temporada de sequía (Brown *et al.*, 2001). Por otro lado, la existencia de taxa exclusivos de la temporada de secas podría deberse a que para algunos grupos, la humedad del suelo no fue el factor más importante

que determinase su distribución, abundancia y sobrevivencia (Wiwatwitaya y Takeda, 2005).

8.2.3 Variación en la profundidad

En nuestro estudio, de forma general, la abundancia de la fauna disminuyó -proporcionalmente a la mitad por cada 10 cm- a medida que la profundidad aumentó de cero hasta 30 cm. Lavelle y Spain (2001) señalan que en la mayoría de los bosques, la superficie constituye una fuente rica en alimento para la fauna edáfica. De modo que la disponibilidad de los recursos que provee la MO decrece al aumentar la profundidad.

La reducción de la abundancia de la fauna, en nuestro estudio, puede estar relacionada con una mayor masa de la capa orgánica, pues en bosques húmedos se ha visto que la cantidad de materia también varía con la profundidad y puede determinar la abundancia de los organismos (Wiwatwitaya y Takeda, 2005). La mayor abundancia en el estrato superficial también pudiera relacionarse con la actividad de los artrópodos epigeos, pues en los bosques tropicales del país, se ha visto que dependen de la presencia de hojarasca para su supervivencia (Brown *et al.*, 2001).

Bardgett (2005) considera que la heterogeneidad espacial del suelo -desde la escala de partículas a la de horizontes- junto con la especialización e interacción de la biota del suelo, actúan como el principal determinante de los patrones de biodiversidad del suelo a escala local. Stevens (1992) considera que con la profundidad estos patrones, a escala local, pueden diferir de los patrones generales de distribución. Esto es, a mayor profundidad menor abundancia y menor diversidad de los grupos.

En nuestro caso podría considerarse -en primera instancia- la especialización; por la abundancia de los grupos detritívoros presentes en la profundidad de 10-20 cm. Es en esta profundidad en la cual Rodríguez *et al* (2003) asocian una mayor actividad de grupos específicos durante la descomposición en suelos de Cuba. Es decir, en nuestro estudio son menos los grupos específicos (ej. detritívoros) de macrofauna; los cuales estarían relacionados con la mayor actividad a esta profundidad.

8.2.4 Variación por grupo

Los grupos considerados como raros y en ocasiones como “otros”, como Blattodea y Opiliones, se han encontrado principalmente en el mantillo y raramente en el suelo (Negrete-Yankelevich *et al.*, 2007), lo que podría explicar su presencia en el estrato más superficial del suelo de 0 a 10 cm. En cambio, la mayoría de las especies de las pulgas Siphonaptera son ectoparásitos de vertebrados, principalmente de mamíferos y aves (Whiting *et al.*, 2008). Su presencia en el estrato más profundo del suelo y en la mayor altitud, podría justificarse por la presencia del algún nido cercano al sitio o a la actividad de una madriguera de otro grupo de fauna mayor.

Por lo que se refiere a las arañas, su mayor abundancia en el piso más alto puede relacionarse con su desempeño como depredadoras, al igual que su presencia en el estrato superficial donde sus presas estarían más activas (Uetz, 1975). Dado que su actividad se acentuó en la temporada de secas, nuestro estudio consideraría que, durante esta temporada, el suelo realmente constituye una fuente de alimento, sombra y humedad propicia para las arañas (Vázquez-Rojas y Gaviño-Rojas, 2008), en comparación con la temporada de lluvias. Sin embargo en el matillo del bosque de la CRM, Baltazar (2011) encontró que había un incremento en la población de arañas en la temporada de lluvias. Posiblemente las arañas del mantillo y las del suelo tengan diferentes estrategias de alimentación relacionadas con su hábitat.

Otros depredadores, más pequeños y con mayor actividad en el estrato de 10-20 cm del suelo son los Diplura (Palacios-Vargas y Mejía-Recamier, 2007), aunque en nuestro caso se encontraron como más abundantes antes de los 10 cm, quizá porque a esa profundidad tuvieron una mayor probabilidad de encontrar recursos de taxa de menor talla, como los de la mesofauna.

La densidad de depredadores de mayor tamaño, como los Chilopoda fue más alta en la altitud media y en lo general coincide con la densidad de Oligochaeta; a quienes Salamon *et al.* (2008) han relacionado con la calidad del alimento (en referencia a la proporción C:N) y la consecuente abundancia de depredadores pertenecientes a los Chilopoda de bosques de coníferas.

Las lombrices de tierra comúnmente superan la biomasa y el peso de otros animales y en la temporada de lluvias llegan a ser hasta el doble que en la de secas (Fragoso *et al.*, 2001; Brown *et al.*, 2004; Lavelle y Spain, 2001). Lo anterior explicaría por qué, en nuestro estudio, aunque la proporción de Oligochaeta en ambas temporadas fue similar, en la temporada de lluvias constituyen casi la mitad de todos los organismos de la macrofauna. Además de que Cutz-Pool *et al.* (2010) consideran que las lombrices, en bosques templados, están más relacionadas con condiciones de mayor cantidad de humedad y más templadas de temperatura. Probablemente la mayoría de las especies que constituyen este grupo de lombrices, en nuestro estudio, sean detritívoras u omnívoras (anécicas) y menos geófagas (endógeas), pues su abundancia decrece a mayor profundidad. Fragoso y Rojas (2010) reportaron que en ambientes templados y tropicales predominan las lombrices anécicas y endógeas.

Es importante considerar que la proporción de los anélidos edáficos es similar en el grupo de meso y macrofauna (enquitreidos 64.0 %, 25.8 % y 10.1 % y lombrices 67.25 %, 20.81 % y 11.95 %; ambos grupos de 0 a 30 cm, respectivamente). Fragoso y Rojas (2010) reportan que en los bosques templados los enquitreidos son más abundantes en los primeros centímetros del suelo, mientras que las lombrices tienen una distribución más amplia. La similitud en las proporciones de anélidos de meso y macrofauna contrasta con lo reportado por Heemsbergen (2009), cuyos estudios en suelos de Ámsterdam, mostraron que la distribución vertical de los enquitreidos puede ser opuesta a la de las lombrices, sugiriendo que hay una competencia entre ambos grupos. Dado que la actividad de las lombrices produjo un cambio en el pH del suelo, ello podría ser un factor que contribuyese a excluir la presencia de los enquitreidos (Heemsbergen, 2009).

Otros de los grupos más abundantes en el suelo son los animales que viven alguna etapa de su ciclo de vida en él como la mayoría de los grupos de insectos y otros artrópodos (Coleman *et al.*, 2004). De tal forma que la presencia de Larvas y taxones como Diptera e Hymenoptera, corresponderían a este tipo de insectos.

Específicamente, Baltazar (2011) encontró que las larvas fueron más abundantes en el mantillo del bosque de oyamel de la CRM, respecto a otros tipos de vegetación en la misma cuenca. En nuestro estudio las larvas se encontraron relacionadas con la menor altitud y la

profundidad de 0–10 cm (la más cercana al mantillo) y que seguramente les ofrece más recursos. En el Caribe, Rodríguez *et al.* (2003) también encontraron este patrón al que lo asociaron con la descomposición en el suelo. La abundancia de las larvas también se reportó en el estudio del sistema montañoso del Tíbet, donde en el gradiente altitudinal Jing *et al.* (2005), reportaron que las larvas fueron de los grupos más abundantes.

Por otro lado, los Diptera se encontraron como más abundantes en el piso a mayor altitud pero, de igual forma que los Hymenoptera, solamente se encontraron en la temporada seca. Dado que ambos grupos se observaron en la profundidad más somera, consideramos que la presencia de los Diptera puede coincidir con mayores cantidades de materia orgánica acumulada en la temporada seca, o el desarrollo durante su vida en estados juveniles. La presencia de los Diptera en los bosques de México se relaciona con una alta dependencia a la humedad (Fragoso y Rojas, 2010), lo cual no se encontró en nuestro estudio.

Los Hymenoptera -en nuestro caso avispas- también podrían estar en una etapa específica de su desarrollo, ya que podrían estar usando el suelo como microhábitat de refugio durante la puesta de huevos (Coleman *et al.*, 2004). Por otro lado los individuos de ambos taxa (tanto Diptera como Hymenoptera), luego de su estancia en el suelo, al encontrar condiciones adecuadas para salir -o como adultos reproductores- podrían abandonarlo previo a la temporada de lluvias provocando que prácticamente estuvieran ausentes durante esta temporada.

Otros grupos que se alimentan de residuos orgánicos en descomposición están los Psocoptera y Diplopoda, cuya forma de alimentación puede explicar que fueran más abundantes de 0 a 10 cm, próximos al mantillo, donde se ha reportado previamente que principalmente los Psocoptera suelen ser más abundantes (Coleman *et al.*, 2004; Baltazar, 2011). Los Diplopoda tienden a ser estacionalmente activos, aún en bosques húmedos del país (Bueno-Villegas, 2003), sin embargo en nuestro estudio aparecieron indistintamente en la temporada de secas y de lluvias. mientras que los Psocoptera sólo se encontraron en la temporada de secas, probablemente porque pueden requerir de condiciones más cálidas en el suelo. Su presencia también reforzaría la idea de que dichas condiciones se encuentran en la altitud media. sin embargo en otros bosques templados del país (Cutz-Pool *et al.*, 2010) se ha reportado la distribución de Psocópteros relacionada con la mayor altitud.

Entre los taxa más diversos, tanto específica como funcionalmente se considera a los Coleoptera, los Heteroptera y Homoptera, pues se les encuentra en una vasta cantidad de ambientes, alimentándose de una gran variedad de hongos, plantas y animales (Hutchins *et al.*, 2003). El hecho de que los Homoptera sobrepasaran a los Coleoptera y Heteroptera puede estar relacionado con su alimentación a base de savia, lo que los pudiera volver muy abundantes en el suelo al estar cerca de las raíces; mientras que los Heteroptera y Coleoptera pueden ser depredadores, fitófagos, fungívoros e incluso carroñeros (Hutchins *et al.*, 2003).

La distribución de estos taxa siguió el patrón de la mayoría de los grupos de macrofauna, lo cual podría relacionarse con lo encontrado por Baltazar (2011) quien también reportó a los Coleoptera y Hemiptera como grupos más abundantes en el mantillo de la CRM. De acuerdo con Cutz-Pool *et al.* (2010) los Hemiptera mostraron preferencia por condiciones más templadas de temperatura y menores altitudes en el Iztaccíhuatl. Lo anterior también podría apoyar la idea de que la mayor abundancia de la macrofauna, en el piso altitudinal medio, durante la temporada seca y en la profundidad de 0 a 10 cm, es la más favorable para los organismos de la macrofauna.

9. CONCLUSIONES

En el suelo del bosque de *Abies religiosa* de la Cuenca del río Magdalena (CRM), se encontraron tres grupos de mesofauna, Acarida, Enchytraeidae y Collembola, siendo más abundantes los dos primeros. Por otra parte, se registraron 15 grupos de la macrofauna y los más abundantes fueron Oligochaeta, las Larvas, Homoptera, Coleoptera y Diptera.

La distribución de la mesofauna respecto a la altitud difiere respecto a cada uno de los grupos que la componen. Sin embargo, el piso medio (3 432 m de altitud), constituyó el de mayor abundancia para los grupos de macrofauna y a su vez, donde hubo un menor número de grupos.

En el estrato de 0 a 10 cm se encontró la mayor abundancia de mesofauna y macrofauna, asociada a la mayor disponibilidad de recursos. La distribución vertical de la mesofauna fue de carácter particular y diferenciada para cada uno de sus grupos. En cambio la mayor cantidad de grupos de macrofauna se encontró distribuida de 0 a 10 cm.

La mayor cantidad de grupos de mesofauna y la mayor abundancia se registraron durante la temporada de lluvias. Por otro lado, en el caso de la macrofauna se encontró lo contrario; el mayor número de grupos y la mayor abundancia se registraron durante la temporada de secas.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Almeida-Leñero, L., Nava, M., Ramos, A., Espinosa, M., de Jesús Ordoñez, M. y Jujnovsky, J. 2007. Servicios ecosistémicos en la cuenca del río Magdalena, Distrito Federal, México. *Gaceta ecológica*: 53-64.
- Álvarez-Sánchez, J. 2001. Descomposición y ciclo de nutrientes en ecosistemas terrestres de México. *Acta Zoológica Mexicana*, **1**: 11-19.
- Álvarez, K. 2000. Geografía de la educación ambiental: algunas propuestas de trabajo en el Bosque de los dinamos, Área de Conservación Ecológica de la Delegación Magdalena Contreras. Tesis de licenciatura en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Anderson, J. H. e Ingram, J. S. 1993. Tropical soil biology and fertility: A handbook of methods. CAB. International, Reino Unido. 219 pp.
- Axelsson, B., Lohm, U. y Persson, T. 1984. Enchytraeids, lumbricids and soil arthropods in a northern deciduous woodland - a quantitative study. *Holarctic Ecology*, **7**: 91-103.
- Baltazar Ortega, E. E. 2011. Variación espacio-temporal de la meso y macrofauna del mantillo en la cuenca alta del Río Magdalena. Tesis de Licenciatura en Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Barajas-Guzmán, G. y Álvarez-Sánchez, J. 2003. La comunidad de desintegradores en una selva húmeda tropical. *En: Alvarez-Sánchez, J. y Naranjo-García, E. (Eds). Ecología del suelo en la selva tropical húmeda de México. Instituto de Ecología, AC, Instituto de Biología y Facultad de Ciencias, UNAM, Xalapa, México, 162-184 pp.*
- Bardgett, R. 2005. The biology of soil: A community and ecosystem approach. Oxford University Press on Demand.
- Bardgett, R. D. y Cook, R. 1998. Functional aspects of soil animal diversity in agricultural grasslands. *Applied Soil Ecology*, **10**: 263-276.

- Barois, I., Huising, E. J., Okoth, P., Trejo, D. y De Los Santos, M. 2009. Below-Ground Biodiversity in Sierra Santa Marta, Los Tuxtlas, Veracruz, México. Instituto de Ecología, A. C. 262 pp.
- Brown, G. G., Fragoso, C., Barois, I., Rojas, P., Patrón, J. C., Bueno, J., Moreno, A. G., Lavelle, P., Ordaz, V. y Rodríguez, C. 2001. Diversidad y rol funcional de la macrofauna edáfica en los ecosistemas tropicales mexicanos. *Acta Zoológica Mexicana*, **1**: 79-110.
- Brown, G. G., Moreno, A. G., Barois, I., Fragoso, C., Rojas, P., Hernández, B. y Patrón, J. C. 2004. Soil macrofauna in SE Mexican pastures and the effect of conversion from native to introduced pastures. *Agriculture, ecosystems & environment*, **103**: 313-327.
- Brown, G. G., Swift, M. J., Bennack, D. E., Bunning, S., Montañez, A. y Brussaard, L. 2007. Managing biodiversity in agricultural ecosystems. *En*: Jarvis, D. I., Cooper, H. D. y Padoch, C. (Eds). Columbia University Press, 234-282 pp.
- Brusca, R. 1997. *Isopoda*. The Tree of Life Web Project, 06 August 1997 [citado 30/09/2011]. *En* <http://tolweb.org/Isopoda/6320/1997.08.06>.
- Bueno-Villegas, J. 2003. Los diplópodos del suelo en la selva alta de los tuxtlas. *En*: Alvarez-Sánchez, J. y Naranjo-García, E. (Eds). Ecología del suelo en la selva tropical húmeda de México. Instituto de Ecología, AC, Instituto de Biología y Facultad de Ciencias, UNAM, Xalapa, México, 226-236 pp.
- Castro, J. H., Burbano O, H. y Bonilla, C. R. 2007. Abundancia y biomasa de organismos edáficos en tres usos del terreno en el altiplano de Pasto, Colombia. *Acta Agronómica*, **56**: 127-130.
- Cole, L., Bradford, M. A., Shaw, P. J. y Bardgett, R. D. 2006. The abundance, richness and functional role of soil meso- and macrofauna in temperate grassland—A case study. *Applied Soil Ecology*, **33**: 186-198.

- Coleman, D. C., Crossley Jr, D. A. y Hendrix, P. F. 2004. *Fundamentals of soil ecology*. Academic Press.
- CONABIO. 2009. *Catálogo de autoridades taxonómicas*. Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad [citado 28/09/09]. En http://www.conabio.gob.mx/informacion/catalogo_autoridades/doctos/ortopteros.html.
- CONABIO. 2010. *Catálogo de autoridades taxonómicas*. Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad [citado 24/05/2010]. En http://www.conabio.gob.mx/informacion/catalogo_autoridades/doctos/aracnidos.html
- Cutz-Pool, L. Q., García-A, A., Castaño, G. y Palacios, J. G. 2010. Diversidad de invertebrados de musgos corticícolas en la región del volcán Iztaccíhuatl, Estado de México. *Revista Colombiana de Entomología*, **36**: 90-95.
- Cutz-Pool, L. Q., Palacios-Vargas, J. G. y Castaño-Meneses, G. 2008. Estructura de la comunidad de colémbolos (Hexapoda: Collembola) en musgos corticícolas en el gradiente altitudinal de un bosque subhúmedo de México. *Revista de Biología Tropical*, **56**: 739-748.
- Delgadillo, E. 2011. Productividad Primaria Neta en los Bosques Templados de la Cuenca del Río Magdalena. Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Doube, B. M. y Brown, G. G. 1998. Life in a complex community: Functional interactions between earthworms, organic matter, microorganisms, and plants. *Earthworm ecology*. Edwards Eds. St. Lucie Press., Boca Raton, 179-212 pp.
- Ducarme, X., André, H. M., Wauthy, G. y Lebrun, P. 2004. Are there real endogeic species in temperate forest mites? *Pedobiologia*, **48**: 139-147.
- Eisenhauer, N., Yee, K., Johnson, E. A., Maraun, M., Parkinson, D., Straube, D. y Scheu, S. 2011. Positive relationship between herbaceous layer diversity and the

- performance of soil biota in a temperate forest. *Soil Biology and Biochemistry*, **43**: 462-465.
- Erazo Moreno, M. C. y González-Montaña, L. A. 2008. Mariposas. *En*: Rodríguez-Mahecha, J. V., J.V. Rueda-Almonacid, T.D. Gutiérrez H. (Ed). Guía ilustrada de la fauna del Santuario de Vida Silvestre Los Besotes, Valledupar, Cesar, Colombia, 28 -116 pp.
- Estrada Venegas, E. 2008. Fauna del Suelo I Micro, Meso y Macrofauna. Colegio de Postgraduados.
- Ferguson, S. H. 2001. Changes in trophic abundance of soil arthropods along a grass-shrub-forest gradient. *Canadian journal of zoology*, **79**: 457-464.
- Fragoso, C. 2001. Las lombrices de tierra de México (Annelida, Oligochaeta): Diversidad, Ecología y Manejo. *Acta Zoológica Mexicana*, (**n. s**): 131-171.
- Fragoso, C., Reyes-Castillo, P. y Rojas, P. 2001. La importancia de la biota edáfica en México. *Acta Zoológica Mexicana. Número especial*, **1**: 1-10.
- Fragoso, C. y Rojas, P. 2010. La vida microcósmica en el suelo. *En*: Toledo, V. M. (Ed). La biodiversidad de México: Inventarios, manejos, usos, informática, conservación e importancia cultural. Fondo de Cultura Económica, 356 pp.
- Fragoso, C. y Rojas, P. 2014. Biodiversidad de lombrices de tierra (annelida: Oligochaeta: Crassicitellata) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, **85**: 197-207.
- Galeana Pizaña, M. 2008. Mapa de Vegetación y Uso de Suelo Cuenca del Río Magdalena. Laboratorio de Ecosistemas de Montaña, Colegio de Geografía.
- García de Miranda, E. 2004. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática Köppen: para adaptarlo a las condiciones de la república mexicana. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. 60 pp.

- García Gómez, A. 2009. Estructura de comunidades de artrópodos edáficos asociados a suelo y hojarasca, en diferentes altitudes del Iztaccíhuatl. Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gizzi, A. H., Álvarez Castillo, H. A., López, A. N., Clemente, N. L. y Studdert, G. A. 2009. Caracterización de la meso y macrofauna edáfica en sistemas de cultivo del Sudeste Bonaerense. *Ciencia del suelo*, **27**: 1-9.
- Gullan, P. J. y Cranston, P. 2005. The insects: an outline of entomology. Blackwell Publishing, UK. 505 pp.
- Heemsbergen, D. A. 2009. Soil detritivore functioning in heterogeneously contaminated soils. Amsterdam: Vrije Universiteit. 156 pp.
- Herrera, F. F. y Cuevas, E. 2003. Artrópodos del suelo como bioindicadores de recuperación de sistemas perturbados. *Venesuelos*, **11**: 67-78.
- Hutchins, M., Evans, A. V., Garrison, R. W. y Schlager, N. 2003. Grzimek's Animal life encyclopedia. Insects. Farmington Hills, MI: Gale Group. . 472 pp.
- INEGI. 2005. *Marco geoestadístico nacional*. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. En www.inegi.gob.mx.
- IUSS y WRB. 2007. World Reference Base for Soil Resources. FAO, Roma. 127 pp.
- Jing, S., Solhoy, T., Huifu, W., Vollan, T. I. y Rumei, X. 2005. Differences in soil arthropod communities along a high altitude gradient at Shergyla Mountain, Tibet, China. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, **37**: 261-266.
- Jujnovsky, J. 2003. Las unidades de paisaje en la cuenca alta del río Magdalena, México, D.F base fundamental para la planificación ambiental. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Krantz, G. W., Walter, D. E. y Behan-Pelletier, V. 2009. A manual of Acarology. Texas Tech University Press.

- Laiho, R., Silvan, N., Cárcamo, H. y Vasander, H. 2001. Effects of water level and nutrients on spatial distribution of soil mesofauna in peatlands drained for forestry in Finland. *Applied Soil Ecology*, **16**: 1-9.
- Lavelle, P. 1996. Diversity of soil fauna and ecosystem function. *Biology International*, **33**: 3-16.
- Lavelle, P., Decaens, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F., Margerie, P., Mora, P. y Rossi, J. P. 2006. Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology*, **42**: S3-S15.
- Lavelle, P. y Spain, A. V. 2001. Soil ecology. Kluwer Academic Publisher. 654 pp.
- León-Gamboa, A. L., Carolina, R. y Ruth, G. R. M. 2010. Efecto de plantaciones de pino en la artropofauna del suelo de un bosque Altoandino. *Revista de Biología Tropical*, **58**: 1031-1048.
- López, A. N., Vincini, A. M., Clemente, N. L., Manetti, P. L., Carmona, D. M. y Álvarez Castillo, H. A. 2005. Densidad estacional y distribución vertical de los Enchytraeidae (Annelida: Oligochaeta) en diferentes sistemas de producción. *Ciencia del suelo*, **23**: 115-121.
- Luis Martínez, M. A. 1987. Distribución altitudinal y estacional de los Papilionoidea (Insecta: Lepidoptera) en la cañada de los dinamos; Magdalena Contreras, D. F. Tesis de Licenciatura en Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Macroproyecto Manejo de Ecosistemas y Desarrollo Humano. 2008. Informe de actividades 2005-2008. Universidad Nacional Autónoma de México, 36-59 pp.
- Malmström, A., Persson, T., Ahlström, K., Gongalsky, K. B. y Bengtsson, J. 2009. Dynamics of soil meso-and macrofauna during a 5-year period after clear-cut burning in a boreal forest. *Applied Soil Ecology*, **43**: 61-74.

- Mangeaud, A. 2004. La aplicación de Técnicas de Ordenación Multivariadas en la Entomología. *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina*, **63**: 1-10.
- Manzanilla-López, R. 2008. Los nemátodos, su papel biológico en el ambiente edáfico. *En: Estrada Venegas, E. (Ed). Fauna del Suelo I micro, meso y macrofauna.* 23-32 pp.
- Maraldo, K., Weber, R. H., Slotsbo, S. y Holmstrup, M. 2009. Enchytraeidae (Oligochaeta) in a changing climate: Ecology and ecophysiology of enchytraeids exposed to climate changes. Department of Terrestrial Ecology, National Environmental Research Institute, Aarhus University.
- Méndez-Montiel, J. T. y Equihua-Martínez, A. 2008. Influencia benéfica de los termes (Isoptera) en los suelos. *En: Estrada Venegas, E. (Ed). Fauna del suelo I Micro, Meso y Macrofauna.* Colegio de Postgraduados, 126-132 pp.
- McGavin, G. C. 2002. Entomología esencial. Ariel, España. 349 pp.
- Morales, J. y Sarmiento, L. 2002. Dinámica de los macroinvertebrados edáficos y su relación con la vegetación en una sucesión secundaria en el páramo venezolano. *Ecotropicos*, **15**: 99-110.
- Naranjo-García, E. 2003. Malacofauna de la hojarasca. *En: Alvarez-Sánchez, J. y Naranjo-García, E. (Eds). Ecología del suelo en la selva tropical húmeda de México.* Instituto de Ecología, A. C., Instituto de Biología y Facultad de Ciencias, UNAM, Xalapa, México, 142-161 pp.
- Nava, M. 2003. Los bosques de la cuenca alta del río Magdalena, D.F. México. Un estudio de vegetación y fitodiversidad. Tesis de licenciatura en Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Navarro García, A. 2005. *El suelo como hábitat. Fauna del suelo.* Universidad de Extremadura. Departamento de Biología y Producción de los Vegetales. Área de Edafología y Química Agrícola, 3/10/05 [citado 25/05/2010]. *En* <http://www.unex.es/edafo/ECAP/ECAL6Fauna.html>

- Negrete-Yankelevich, S., Fragoso, C., Newton, A. C. y Heal, O. W. 2007. Successional changes in soil, litter and macroinvertebrate parameters following selective logging in a Mexican Cloud Forest. *Applied Soil Ecology*, **35**: 340-355.
- Palacios-Vargas, J. G. y Mejía-Recamier, B. E. 2007. Técnicas de colecta montaje y conservación de microartrópodos edáficos. Las Prensas de Ciencias. 74 pp.
- Pla, L. E. 1986. Análisis multivariado: Método de componentes principales. Secretaria General de los Estados Unidos Americanos, Washington, D.C.
- Plan Maestro de Manejo Integral y Aprovechamiento Sustentable de la Cuenca Del Río Magdalena. 2008. Secretaria del Medio Ambiente, Distrito Federal. Participante, Facultad de Ciencias, UNAM. 329 pp.
- Ramírez Gutiérrez, A. 2008. Densidad de la fauna edáfica como indicador de calidad del suelo en bosques templados y zonas adyacentes en México. Tesis de licenciatura en Biología, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rodríguez, I., Crespo, G. y Fraga, S. 2003. Actividad de la mesofauna y la macrofauna en las bostas durante su proceso de descomposición. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, **37**: 319.
- Rueda, D. M., Negrete Yankelevich, S. y Fragoso González, C. 2011. Escala de independencia espacial de la mesofauna edáfica en un transecto bosque-pastizal del Jardín Botánico "Francisco Javier Clavijero". *Acta Zoológica Mexicana*, **27**: 191-195.
- Rzedowski, J. 1975. Flora y vegetación en la cuenca del Valle de México. Talleres Gráficos de la Nación, México, D. F.
- Rzedowski, J. 1994. Vegetación de México. Editorial Limusa.

- Salamon, J. A., Zaitsev, A., Gärtner, S. y Wolters, V. 2008. Soil macrofaunal response to forest conversion from pure coniferous stands into semi-natural montane forests. *Applied Soil Ecology*, **40**: 491-498.
- Santibáñez-Andrade, G. 2009. Composición y estructura del bosque de *Abies religiosa* en función de la heterogeneidad ambiental y determinación de su grado de conservación en la cuenca del Río Magdalena, México, D.F. Maestro en Ciencias Biológicas, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.
- SIIT-CONABIO. 2008. Sistema Integrado de Información Taxonómica. *Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad*. En: http://www.conabio.gob.mx/informacion/catalogo_autoridades/doctos/siit.html
- Stevens, G. C. 1992. The elevational gradient in altitudinal range: An extension of Rapoport's latitudinal rule to altitude. *American Naturalist*, **140**: 893-911.
- Uetz, G. W. 1975. Temporal and spatial variation in species diversity of wandering spiders (Araneae) in deciduous forest litter. *Environmental Entomology*, **4**: 719-724.
- Vázquez-Rojas, I. M. y Gaviño-Rojas, R. 2008. Los arácnidos y su relación con el suelo. *En*: Estrada Venegas, E. (Ed). Fauna del suelo I Micro, Meso y Macrofauna. Colegio de Postgraduados, 114-125 pp.
- Whiting, M. F., Whiting, A. S., Hastriter, M. W. y Dittmar, K. 2008. A molecular phylogeny of fleas (insecta: Siphonaptera): Origins and host associations. *Cladistics*, **24**: 677-707.
- Wiwatwitaya, D. y Takeda, H. 2005. Seasonal changes in soil arthropod abundance in the dry evergreen forest of north-east Thailand, with special reference to collembolan communities. *Ecological Research*, **20**: 59-70.
- Zar, J. 1999. Bioestatistical analysis. Prentice-Hall Press, Upper Saddle River, New Jersey.