



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

FACULTAD DE CIENCIAS

ESTRUCTURA DE COMUNIDADES DE ARTRÓPODOS
EDÁFICOS ASOCIADOS A SUELO Y HOJARASCA, EN
DIFERENTES ALTITUDES DEL IZTACCÍHUATL.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
(BIOLOGÍA AMBIENTAL)

P R E S E N T A

BIÓL. ARTURO GARCÍA GÓMEZ

DIRECTOR DE TESIS: DR. JOSÉ GUADALUPE PALACIOS VARGAS

MÉXICO, D. F.

FEBRERO, 2009



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Dr. Isidro Ávila Martínez
Director General de Administración Escolar, UNAM
Presente

Me permito informar a usted que en la reunión ordinaria del Comité Académico del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día 24 de noviembre de 2008, se aprobó el siguiente jurado para el examen de grado de **MAESTRÍA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS (BIOLOGÍA AMBIENTAL)** del alumno **GARCÍA GÓMEZ ARTURO** con número de cuenta **94106592** con la tesis titulada **"ESTRUCTURA DE COMUNIDADES DE ARTRÓPODOS EDÁFICOS ASOCIADOS A SUELO Y HOJARASCA, EN DIFERENTES ALTITUDES DEL IZTACCÍHUATL"**, realizada bajo la dirección del **DR. JOSÉ GUADALUPE PALACIOS VARGAS**:

Presidente: DR. ALFONSO NERI GARCÍA ALDRETE
Vocal: DR. GERARDO RIVAS LECHUGA
Secretario: DR. JOSÉ GUADALUPE PALACIOS VARGAS
Suplente: M. en C. RICARDO IGLESIAS MENDOZA RICARDO
Suplente: DRA. ROSA GABRIELA CASTAÑO MENESES

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, D.F., a 26 de enero de 2009.


Dr. Juan Núñez Farfán
Coordinador del Programa

AGRADECIMIENTOS.

Al **Posgrado de Ciencias Biológicas**, por las facilidades en la culminación de mis estudios de maestría.

A **CONACyT** por darme la beca durante los dos años que duró la obtención del 100% de los créditos de la maestría.

A la **Facultad de Ciencias, UNAM** por el apoyo logístico al presentar los trabajos derivados del proyecto de investigación de la Maestría en Ciencias en el XL Congreso Nacional de Entomología llevado a cabo en la Ciudad de Tapachula, Chiapas y el 11th International Colloquium on Apterygota realizado en Roi, Francia.

Al **Dr. José G. Palacios Vargas**, director de esta tesis, por su ayuda, apoyo y confianza que siempre me brindo durante mi desarrollo y formación académica, así como por la corroboración de las identificaciones.

A los **Drs. Alfonso N. García Aldrete, Gerardo Rivas Lechuga, R. Gabriela Castaño Meneses** y al **M. en C. Ricardo Iglesias Mendoza**, miembros del comité tutorial, quienes siempre estuvieron a mi lado para plantear las interrogantes sobre mi tesis.

Agradezco particularmente a la **Dra. Gabriela Castaño Meneses**, por aceptar a alguien tan desidioso y encaminarlo a la ecología, y principalmente por brindarme la oportunidad de tener una gran amiga.

Al Laboratorio de Edafología, Nicolás Aguilera, UNAM, particularmente a **Elizabeth Fuentes Romero, Rosalía Ramos Bello, Abel Ibáñez Huerta e Iván E. Reyes Solís**, por su apoyo en los diferentes análisis edafológicos, que se utilizaron para la realización del presente trabajo.

A mi equipo de campo, **M. en C. Carmen Maldonado, M. en C. Daniel A. Estrada, Biól. Aldo Bernal, Biól. Leonardo Gonzáles** y a la **P. de Biól. Almannavarro**, ya que sin su ayuda, las colectas a temperaturas muy bajas, no hubieran sido lo mismo.

Al **P. de Biól. Armando Ponce** por la identificación de las especies de plantas involucradas en la tesis.

DEDICATORIAS

Pues a mi **MA**, ¿Qué, hay otra?, por toda su confianza en mis logros, a pesar de pelearnos todas las noches.

A mis hermanos **Sandra** y **Luis Miguel**, quienes alegran mis noches, junto con mis sobrinos, **Javier** y **Cristian**, y mi cuñado, con sus grandes ocurrencias infantiles, gracias por todo.

A mis tíos, Pepe, Lupe, Mario (Padrino) y Chuy, y a mis primos, Sonia, Susana, Emmanuel, José, Alfredo, Cesar (†), Eli, Oscar, Dulce, Cristina, Mimi, Mario, Bere, Ana y Maria, quienes han soportado este carácter de los mil demonios.

A mis compañeros de carrera, Elisa (China), Flor, Anahí (Anchi), Jorge (Chino), Ricardo (Rich), Carlos (Timón), Rodrigo, Itzel Becerra e Ivan que ha pesar separarnos bastante, me han apoyado con muy buenos comentarios, y afortunadamente aun estamos en contacto (vía electrónica).

A los integrantes del laboratorio de Ecología y sistemática de Microartrópodos, gracias por todos sus comentarios, y en particular a Blanca Recamier por su gran amistad.

A toda la bandota de Montañismo, quienes siempre me han apoyado en cualquier locura que me viene a la mente, en especial a Canseco, Ángel, Robert, Javier, Fanny, Pick de Esther, Lencho, Arturo Robles, Carlos, Compa, Tepe, Emilio, SOCO, Toño, Ana, Ram, Miriam, por supuesto al Santo Negro, y a mucha, mucha gente que en estos momentos se me van por nombre, pero los tengo presentes en mente y espíritu.

A toda la gente que me conoce y me apoyo a lo largo de mis estudios profesionales, tanto a compañeros profesores de la Facultad de Ciencias, UNAM, como a la gran cantidad de alumnos a lo que he tenido la fortuna de dar clase.

A **Cristina Sánchez López**, mi abuela †
Para mi primo **Cesar Pérez Gómez** †
y mi hermanazo **Mariano Fuentes Silva** †,
quienes sólo se han adelantado en este camino
esperando con una rica y fría “chela”.

Y especialmente, a ti **FLACA**, por todo lo que me has dado.

Hoy va a ser el día
en que ellos van a recordarte lo que pasó
tú ya deberías de algún modo
haberte dado cuenta de lo que tienes que hacer.

Yo no creo que nadie
sienta lo que siento por ti ahora.

Otra vez, el chisme que está en las calles
es que tu corazón está quemándose,
estoy seguro que lo has escuchado antes,
pero realmente nunca dudaste.

Yo no creo que nadie
sienta lo que siento por ti ahora.

Y todos los caminos en los que tenemos que andar, están poniéndose difíciles,
y todas las luces que nos guían hacia allá, están apagándose,
hay muchas cosas que
me gustaría decirte
pero no sé cómo

porque tal vez,
¿vas a ser la única que me salve?
y después de todo
eres mi "WONDERWALL"

OASIS

CONTENIDO

	Resumen.....	1
	Abstract.....	2
1	Introducción.....	3
1.1	Comunidades.....	3
1.2	Suelo.....	4
1.3	Relieve.....	5
1.4	Clima.....	5
1.5	Materia orgánica.....	6
1.5.1	Hojarasca.....	7
1.5.2	Pedofauna.....	7
1.6	Colémbolos.....	9
2	Zona de estudio.....	12
2.1	Ubicación geográfica del Iztaccíhuatl.....	12
2.2	Composición litológica.....	12
2.3	Hidrología.....	14
2.4	Clima.....	14
2.5	Vegetación.....	15
3	Antecedentes.....	17
4	Objetivos.....	20
5	Hipótesis.....	20
6	Método.....	21
6.1	Zona de colecta.....	21
6.2	Muestreo.....	21
6.3	Procesamiento de muestras biológicas.....	22
6.4	Procesamiento del suelo.....	22
6.5	Pruebas estadísticas.....	22
7	Resultados.....	24
7.1	Abundancias y densidades de colémbolos edáficos de la ladera noroeste del Volcán Iztaccíhuatl.....	24
7.1.1	Discusión.....	32

7.2	Diversidad de colémbolos de la ladera noroeste del Volcán Iztaccíhuatl.....	34
7.2.1	Discusión.....	35
7.3	Efectos de la altitud, biotopo y fecha de colecta sobre los factores bióticos y densidades de los colémbolos.....	38
7.3.1	Discusión.....	50
7.4	Variables bióticas y abióticas del suelo sobre las poblaciones de colémbolos.....	53
7.4.1	Discusión.....	56
7.5	Variables físicas, químicas y biológicas del suelo sobre el ensamblaje de la colembofauna del Iztaccíhuatl.....	60
7.5.1	Discusión.....	63
8	Conclusiones.....	65
9	Bibliografía.....	68
10	Apéndice.....	75

Resumen

En México, los bosques templados de montaña son ecosistemas que han sido poco estudiados en lo referente a la mesofauna de sus suelos, en general y en particular en lo que involucra a los microartrópodos y su relación con el suelo.

La alta densidad de ácaros y colémbolos, aunado a sus hábitos alimenticios, los hace un componente indispensable tanto en el humus como en la hojarasca, observando una estrecha relación con los hongos y bacterias, al ser controladores y dispersores de sus poblaciones.

Sin embargo, las diferentes condiciones ambientales, como: latitud, inclinación de la montaña, la temperatura, alta concentración de CO₂, el pH de los suelos, el porcentaje de Carbono y humedad, entre otros, hacen que el establecimiento de las asociaciones de colémbolos sea diferente en cada sitio.

Para caracterizar las dichas asociaciones, se realizaron cuatro muestreos (noviembre del 2003, marzo, junio y agosto del 2004), en diferentes altitudes del Iztaccíhuatl (2,750; 3,015; 3,250 y 3,685 m snm). Se plantearon como objetivos determinar la densidad y diversidad de la colembofauna, así como determinar (a través de estadísticos) qué factores bióticos o abióticos, son importantes para esas comunidades.

A lo largo de las colectas, se encontraron 77,113 organismos, de éstos, el 31 % corresponde a los colémbolos, de los cuales se obtuvieron 12 familias, distribuidos en 46 géneros y 86 especies.

Se encontró que la altitud y el CO₂ son factores importantes para el establecimiento de las diferentes poblaciones. Además, la heterogeneidad de la montaña establece microambientes ideales para la asociación de diferentes poblaciones.

La mayor densidad se obtuvo a los 3,687 m, y el piso de mayor diversidad fue el correspondiente a los 3,250 m, por lo que se observó que a mayor altitud la diversidad y densidad de los colémbolos aumenta.

Abstract

Soil mesofauna (including microarthropods and their relationship with soil) in Mexican temperate mountain forest have been very poorly studied.

The high density of mites and springtails, with their feeding habits, makes them an indispensable component in the humus and in litter, and they have a close relationship with the fungi and bacteria, for being controlling their populations and to dispersing their spores.

Nevertheless, the different environmental conditions, including: latitude, slope gradient, temperature, CO₂ concentration, soil pH, carbon percentage and humidity, among others, cause the springtails population to be different in each site.

In order to characterize the different populations, four samplings were done (November, 2003, March, June and August, 2004), in different altitudes on Iztaccíhuatl (2,750; 3,015; 3,250 and 3,685 m asl). The main objectives were to determine the density and diversity of springtails, as well as to determine what biotic and abiotic factors are important for the communities.

Throughout the samplings a total of 77,113 arthropods were collected, of these, 31 % belong the collembola; from 12 families, distributed in 46 genera and 86 species were identified.

It was found that the altitude and the CO₂ concentration, are the most important factors for the establishment of the different populations. In addition, the heterogeneity of the mountain creates ideal microenvironments for the establishment of different populations.

The greatest density was obtained at the 3,687 m asl, and the biggest diversity was at 3,250 m asl, so the it was noted that at higher altitudes the diversity and density of the collembola increase.

1. Introducción

En México, los bosques templados de montaña son ecosistemas que han sido relativamente poco estudiados en lo referente a la mesofauna de sus suelos, en general y en particular en lo que involucra a los microartrópodos y su relación con el suelo. Se pueden mencionar algunos trabajos realizados en el Popocatepetl (Palacios-Vargas 1985); El Chico, Hidalgo (Palacios-Vargas & Castaño-Meneses 2002, 2003) y el Iztaccíhuatl (García-Gómez 2005).

Los microartrópodos comprenden principalmente ácaros, arácnidos y hexápodos, siendo los oribátidos y colémbolos los grupos dominantes en el suelo y hojarasca de bosques, ya que representan más de 90 % de individuos (Ducarme *et al.* 2004, Jing *et al.* 2005, Cutz *et al.* 2006).

Esta alta densidad de organismos, aunado a sus hábitos alimenticios, los hace un componente indispensable tanto en el humus como en la hojarasca, observando una estrecha relación con los hongos y bacterias, al ser controladores y dispersores de sus diferentes poblaciones (Tissaux 1996).

Los ecosistemas de montaña son hábitats donde la actividad de mineralización es más lenta debido a las condiciones climáticas propias de la altitud, temperatura, precipitación, tipo de vegetación y tipo de suelo, entre otros factores, por lo que el papel de la mesofauna edáfica es indispensable para acelerar tales procesos (Liu *et al.* 2000, Thaiutsa & Granger 2000).

Debido a lo anterior, el conocer cómo se encuentran estructuradas las diferentes comunidades de colémbolos, tomando en consideración la altitud, tipo de vegetación y parámetros edáficos afines, como pH, humedad relativa y proporción de CO₂, entre otros, es el objetivo de la presente investigación, en particular para la ladera noroeste del Iztaccíhuatl. Los resultados obtenidos ayudarán a comprender mejor la forma en que se distribuyen estas comunidades en un ecosistema templado.

1.1 Comunidades

Los organismos no existen solos en la naturaleza, sino que forman parte de un conjunto de poblaciones que viven juntas en una misma área, es decir, constituyen una comunidad. La comunidad se puede definir como el conjunto de especies de bacterias,

hongos, protozoarios, plantas y animales que viven en un hábitat determinado y se afectan mutuamente, como parte de la red trófica o por influir de diferentes maneras sobre el ambiente físico (Wilson 1994).

Whitaker (citado por Giller 1984), describe a la comunidad como una combinación de poblaciones de plantas, animales y bacterias, que interactúan unas con otras en un determinado hábitat, creando un sistema de vida distinguible, el cual muestra propiedades tales como: composición, estructura, relaciones ambientales, desarrollo y función.

Zoólogos y botánicos han definido a la comunidad en formas muy diferentes, pero siempre se consideran las siguientes características (Krebs 1985):

- Diversidad de especies.
- Estructura y forma de crecimiento.
- Predominio.
- Abundancia relativa.
- Estructura trófica.

De estos cinco puntos, en el presente trabajo sólo se realizará la estimación de diversidad de especies, el predominio y la abundancia relativa de las mismas en el área de estudio.

Además es necesario considerar otros factores, ya que una comunidad debe interactuar con diferentes factores climáticos, tales como cambios de temperatura, humedad, insolación, inundación, etc., que moldean su estructura a través del tiempo.

Particularmente en las comunidades de suelos de montaña, el relieve es un factor de suma importancia para el establecimiento de las misma (Cassagnau 1961). Además de ello, existen interacciones tanto con la materia orgánica, humus, hongos y las bacterias; así como factores abióticos, como el pH, concentraciones de carbono y nitrógeno, iones, etc.

Por tal motivo la interacción de todos estos factores da como resultado un hábitat particular, en el cual se relacionan y conviven las diferentes especies.

1.2 Suelo

Para Butticaz (1996), el suelo puede ser entendido como un producto de la actividad vital de los organismos (bacterias, hongos, plantas y animales) que,

conjuntamente con los factores climáticos, actúan sobre un sustrato inorgánico y dan lugar a un soporte dinámico para la vida de estos mismos organismos.

Además, se puede dividir en diferentes horizontes y de manera general el “O” (materia orgánica) y el “A” los de mayor interés biológico, ya que es donde se encuentra la biota y, por ende, donde se lleva a cabo la mayoría de los procesos de mineralización (Coineau 1995), es decir, el retorno natural de la materia orgánica y bioelementos al suelo, siendo la principal forma de reciclaje de nutrimentos de los ecosistemas forestales (Prause *et al.* 2003).

Para llevar a cabo dicho proceso, es necesario tener en cuenta factores como son la calidad de la materia orgánica, y la actividad orgánica (Heneghan *et al.* 1998).

Por todas sus características, el suelo debe ser considerado como algo vivo, con su propia fisiología, en un equilibrio dinámico que se establece entre los organismos y el medio físico.

1.3 Relieve

El relieve es importante para la formación de los suelos, sobre todo cuando éstos se encuentran en una montaña como el Iztaccíhuatl, donde existen desde pendientes casi imperceptibles, hasta las muy pronunciadas.

De tal forma la vegetación juega un papel importante en la formación de suelos, principalmente porque disminuyen la erosión tanto hídrica como mecánica en pendientes muy pronunciadas; así, el tipo de vegetación suele tener diferencias en cada lugar, debido principalmente a la pedogénesis y altitud en cada sitio, por lo que se esperarían una disimilitud de comunidades contiguas en el espacio (Llorente 2002).

Por parte de la fauna, Luciañez y Simón (1991) mencionan que las diversas comunidades de microartrópodos se distribuyen de acuerdo a sus necesidades, y tienen preferencias por algún tipo de estrato, por lo que los colémbolos pueden presentar distintas distribuciones en una misma altitud si se encuentran localizadas en pendientes con diferente ángulo de inclinación.

1.4 Clima

Las diferentes áreas terrestres continuamente están siendo modificadas por el intemperismo y la erosión (Blyth & Freitas 1997), por medio del cambio de temperatura, lluvias, viento, etc., por consiguiente los procesos pedológicos son distintos en cada hábitat (Butticaz 1996).

Por ejemplo, la energía calorífica durante el día eleva la temperatura del suelo y evapora el agua, y por la noche ocurre el efecto contrario, de tal forma que los suelos sufren cambios estructurales (principalmente en los agregados), por lo que al llegar la erosión eólica, la pérdida de suelo, y por consiguiente también de la biota, es considerable (E. Cotler, com. per.).

En el proceso de mineralización, las características climatológicas varían dependiendo del sitio de estudio, Shanks y Olson (1961), y Williams y Gray (1974), señalan que existen diferencias en el tiempo en que tarda la mineralización a diferentes altitudes, debido a la variación de la temperatura; ésto lo demuestran al comparar la descomposición de la hojarasca a diversas altitudes y llegan a concluir que existe una disminución media de casi 2% cada vez que desciende 1°C la temperatura media anual.

Este parámetro también juega un papel esencial en los procesos de descomposición de la hojarasca, y en la maduración de los compuestos húmicos, que están muy relacionados con la existencia de períodos secos con fuerte elevación de temperatura (Llorente 2002).

Otros estudios señalan que la precipitación juega también un papel importante en la mineralización, ya que el agua de lluvia puede arrastrar excrementos y restos de organismos hacia horizontes más profundos, donde organismos más especializados atacan las moléculas orgánicas restantes. Por tal motivo, en años de sequía la descomposición es más lenta que en años de precipitación normal (Thaiutsa & Granger 2000).

Por consiguiente, al estudiar organismos edáficos se debe tener en cuenta factores como la altitud, la temperatura y la precipitación, ya que éstos son los de mayor importancia para el establecimiento de los diferentes organismos, sobre todo en bosques templados.

1.5 Materia orgánica

La materia orgánica se transforma en sustancias húmicas las cuales se dividen en tres componentes: ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y huminas, dando como productos carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y sulfuro (Peña-Mendez *et al.* 2005). Este cambio corresponde al proceso de mineralización, y puede ser de forma directa y rápida, gracias a las reacciones físicas y químicas de simplificación molecular; o bien, puede ser indirecta, donde se produce por la actividad de microorganismos (hongos y bacterias), permitiendo que los iones inorgánicos sean absorbidos por las plantas

(Lechevallier 1995, Peña-Mendez *et al.* 2005). De tal forma, durante el proceso de humificación, el suelo obtiene una gran cantidad de elementos, los cuales se encuentran en una permanente evolución por mecanismos geo-microbiológicos (Mayhew 2004).

Además, agrupa materia viva (biomasa de origen vegetal o animal), materia en descomposición (conjunto de detritos vegetales, cadáveres y excretas de animales), compuestos orgánicos intermedios o materia orgánica transitoria y sustancias húmicas reagrupadas bajo el termino de humus (Lechevallier 1995).

En general, la materia orgánica está constituida de dos unidades: la hojarasca, constituida por hojas en descomposición, además de materia animal senescente, hongos, bacterias, diferente fauna y biomasa microbiana, y el humus; éste último en sentido amplio, está constituido de dos subelementos: el humus libre (materia orgánica no humificada) y el humus ligado (materia orgánica humificada). El primero, es una fracción ligera en proporción carbono: nitrógeno (C:N), fácilmente biodegradable y de uniones sencillas con las arcillas. El segundo es el humus en sentido estricto, y está constituido por una fracción densa en C:N, difícilmente biodegradable y fuertemente ligada a las arcillas (Tissaux 1996).

1.5.1 Hojarasca

Es la parte donde se encuentra la materia orgánica, tanto en descomposición, como viviente, y está constituida de dos factores: la fracción hidrosoluble y la no-hidrosoluble. La primera es aquella que rápidamente se filtra hacia los horizontes más profundos, poco después de la caída de las hojas y es rica en sustancias complejas. Por otro lado la fracción no hidrosoluble está compuesta por la microflora y la pedofauna (Tissaux 1996).

La degradación de la hojarasca no es igual en los diferentes tipos de vegetación, por ejemplo en un bosque húmedo el proceso de mineralización es más rápido en comparación a un bosque templado, ya que contiene (generalmente) menos potasio, menos fósforo, más lignina y, casi siempre, más fracción soluble en éter (Thaiutsa y Granger 2000), por tal motivo, la presencia de los diferentes artrópodos edáficos es de suma importancia, ya que ayudan a fragmentar la materia vegetal en bosques templados.

1.5.2 Pedofauna

El papel primario en la mineralización es llevado a cabo en gran medida por bacterias y hongos, quienes son los principales descomponedores. Pero también se ha

observado que los animales del suelo afectan positivamente la biomasa y la actividad de la comunidad microbiana (Cragg y Bardgett 2001).

La fauna edáfica fragmenta la materia orgánica acelerando la propagación de microorganismos, de esta forma estimulan y controlan la actividad de colonias de bacterias y hongos; además, participan en la elaboración de los agregados. De tal forma, la actividad de los organismos del suelo está directamente relacionada con la productividad del bosque (Paquin y Coderre 1997).

Para Swift *et al.* (1979 en Tissaux 1996), la clasificación de la pedofauna se hace por la talla de los animales y por el diámetro de su cuerpo; de esta forma, podemos distinguir tres grupos principales: la microfauna (1-100µm), la mesofauna (100µm-2 mm) y la macrofauna (2-20 mm).

La mesofauna está compuesta de colémbolos, ácaros, enquitréidos y larvas de dípteros, entre otros. Estos grupos son importantes en todos los ecosistemas terrestres, ya que ellos forman la red alimenticia detritívora, ayudan a la fragmentación de la materia orgánica, y son esenciales en la futura formación de sustancias húmicas, por lo que algunos grupos son tomados como indicadores de la calidad del aire o suelo de los diferentes ecosistemas (Rusek y Marshall 2000). Además, su papel en el proceso de descomposición es el de regular las poblaciones microbianas, que al interactuar con ellas juegan el rol primario de mineralización de nutrientes (Cole *et al.* 2005), y de alimentarse de restos de la macrofauna (Tissaux 1996).

Dentro de los artrópodos, los ácaros y colémbolos, son los que realizan principalmente la trituración de la hojarasca. La trituración es la fragmentación y la reestructuración física de la materia orgánica por la masticación, haciendo que parte de los compuestos resistentes se concentren en los restos fecales y el resto se libere, al medio, en nutrientes como nitrógeno y potasio (Adejuyigbe *et al.* 2006), con lo cual presentan un estatus nutricional importante y potencialmente utilizable por otros microorganismos, como bacterias y hongos (Tissaux 1996).

Además, por medio de las enzimas que se encuentran en su tracto digestivo, ayudan a la formación de agregados por sus desechos orgánicos, o cuando mueren, sus endoenzimas facilitan una pronta degradación de la quitina. De esta forma, juegan un papel importante en los procesos de descomposición y de mineralización (Doles *et al.* 2001, Dress y Boerner 2004).

Rusek (1998), mencionó que los colémbolos son generalmente micófagos, es decir, no digieren la celulosa ni la lignina, pero se alimentan de micelios, donde los elementos

ya se encuentran transformados. Además, estos artrópodos sólo se alimentan de los organismos senescentes, ya que los activos ejercen una repulsión química (Bachelier 1980, en Tisaux 1996).

La acción de los colémbolos es tan fuerte sobre las diferentes poblaciones fúngicas, en el reciclaje de nutrientes, que puede aumentar o disminuir la competencia de las bacterias. Parkinson *et al.* (1979), demostró que la selectividad de *Heteraphorura subtenuis* sobre un basidiomicete ayudó a ser una especie dominante sobre una colonia bacteriana donde la competencia era de forma estable. Por consiguiente, los colémbolos pueden llegar a afectar la estructura de las comunidades de hongos.

1.6 Colémbolos

Los colémbolos son pequeños animales que van desde micrones (*Megalothorax*) hasta casi los dos centímetros de largo (*Holocanthella*). Estos artrópodos sin alas, presentan un cuerpo dividido en tres tagmas: una cabeza, un tórax y un abdomen, y se dividen en cuatro órdenes: Poduromorpha, Entomobryomorpha, Symphypleona y Neelipleona. Los dos primeros presentan un cuerpo más o menos alargado y los restantes lo tienen de forma globosa.

La estructura que le da el nombre a los colémbolos es el tubo ventral ó colóforo, el cual consiste en un saco eversible en el primer segmento abdominal (Christiansen 1992). Dicho órgano es extremadamente importante para el balance de fluidos y puede ser usado como un apéndice pegajoso, el cual les permite adherirse a superficies resbalosas (Hopkin 2002).

Sin embargo, en muchos grupos la característica más evidente, es la fúrcula, que se encuentra en la parte basal del cuarto segmento abdominal, en algunos grupos dicha estructura está totalmente reducida, e incluso puede llegar a perderse (Hopkin 2002).

Gisin (1943 en Detsis 2000) y Palacios-Vargas (2002) clasifican a los colémbolos por sus formas de vida (Cuadro 1). Dependiendo por su afinidad por el medio edáfico, podemos clasificar a los distintos grupos de la fauna del suelo como: euedáficos (especies que viven en el medio edáfico); hemiedáficos (especies que viven tanto en el interior del suelo como en el humus y hojarasca) y epiedáficos (siempre viven en la hojarasca y partes superiores).

Por otro lado, numerosos estudios muestran que la mayoría de los colémbolos habitan tanto en la hojarasca, como en el humus y en los primeros diez centímetros de profundidad del suelo (Larsen *et al.* 2003).

Cuadro 1.-Clasificación de los colémbolos por forma de vida (Propuesta por Gisin, 1943, modificada por Palacios-Vargas 2002). L= Largo, C= Corto

Categoría	Características.						Ambientes v. gr.
	Ojos	Pigm.	Ant.	Patas	Fúrcula	Faneras	Hábitat / v. gr. Doseil
Epiedáficas Hemiedáficas	8	+	L	L	L	L	<i>Salina</i> (Paronellidae)
Normal	8	+	C	C	C	-	Hojarasca <i>Ceratophysella</i> (Hypogastruridae)
Xeromorfa	8-	+-	C	C	C	-	Musgos, líquenes <i>Friesea</i> (Neanuridae)
Epineústicas	8-	+-	C-L	C	C	-	Superficie del agua <i>Ballistura</i> (Isotomidae)
Litorales	8-	+-	C	C	C	+	<i>Isotogastrura</i> (Isotogastruridae)
Euedáficas	0	-	C	C	C-red	-	Suelo y cuevas <i>Mesaphorura</i> (Onychiuridae)
Sinecomorfas	0	-	L	L	L	+	Hormigueros y termiteros <i>Cyphoderus</i> (Cyphoderidae)
Troglomorfas	0	-	L	L	L	+	Cuevas y grutas <i>Arrhopalites</i> (Arrhopalitidae)

Sin embargo, las diferentes formas edáficas se pueden encontrar en diferentes horizontes, ya que existe un continuo flujo de especies, presentando constantes migraciones verticales, que ocurren por diferencias microclimáticas del hábitat edáfico (Detsis 2000).

De esta forma, los colémbolos juegan un papel importante en la microestructura del suelo, representando una fracción cualitativa y cuantitativamente muy importante de la fauna edáfica. Así, la biomasa del grupo aumenta conforme las condiciones ambientales se tornan más estables y húmedas, por ejemplo, se ha estimado en 150 mg de masa seca por m² en la tundra y de 20 mg en un bosque tropical (Rusek 1998).

También se ha visto que sirven como parámetros en lo referente a la conservación en bosques de coníferas (Paquin & Coderre 1997, Kaneko *et al.* 1998), de haya (Deleporte & Tillier 1999), e inclusive pueden llegar a afectar la producción de nitrógeno en el suelo (Mebes & Filser 1998, Fabian 1998).

Por otro lado, los cambios físicos del suelo afectan directamente a las comunidades, ya sea positiva o negativamente, por ejemplo, las poblaciones pueden disminuir conforme aumenta la depositación de los diferentes ácidos o de la lignina (Rusek & Marshall 2000), o simplemente del aumento o disminución del pH (Cutz-Pool 2003).

Como se puede apreciar, los colémbolos presentan una elevada relación denso-dependencia con el tipo de suelo y la vegetación, de tal forma que están considerados como indicadores de diversos factores pedológicos (Mateos 1988).

2 Zona de estudio

2.1 Ubicación geográfica del Iztaccíhuatl

En la franja del territorio mexicano comprendida entre los 18° y 22° N se levanta el sistema orográfico denominado Eje Volcánico Transversal, cordillera o Sierra Volcánica transversal, o cordillera Neovolcánica; en él se encuentran los edificios volcánicos de mayor altitud en México, entre los que destacan el Pico de Orizaba o Citlaltépetl (5,747 m), el Popocatépetl (5,452 m) y el Iztaccíhuatl (5,386 m), siendo las cumbres más altas del país (Barrera 1968, Montero 2000).

La cumbre mayor del Iztaccíhuatl (Fig. 1), se encuentra ubicada a 19° 10' 20'' N y a 98° 38' 30'' W (Montero 2000), y junto con el Popocatépetl, forman el Parque Nacional Izta-Popo, el cual comprende 25,675 hectáreas (López 1995). De esta forma, el macizo Popocatépetl-Iztaccíhuatl, o Sierra Nevada, presenta aproximadamente 40 km de largo en dirección noroeste y 15 km de ancho. De la longitud total, al Iztaccíhuatl le corresponden cerca de la tercera parte.

Parte del macizo, que forman los cerros Papagayo, Telapón y Tláloc, constituye el parte aguas, de 90 km de longitud, que separa las cuencas de México y de Puebla (ambas con un nivel base de erosión de cerca de 2,200 m de altitud), y cuyo edificio austral, el Popocatépetl, forma parte del límite superior de la gran depresión del Balsas (Barrera 1968).

2.2 Composición litológica

De ambas montañas, el Iztaccíhuatl es la más antigua, data del Mioceno y, como volcán, está inactivo desde principios del Pleistoceno. La base del Popocatépetl parece ser también del Mioceno, pero el cono actual, constituido sobre el volcán miocénico de Nexpayantla, es del Pleistoceno. Las rocas que constituyen la Sierra Nevada son fundamentalmente andesitas; en el Iztaccíhuatl predomina una andesita gris con anfíboles, en tanto que en el Popocatépetl es una andesita de hiperstena de color negro grisáceo; en ambas montañas, además, se encuentran uno u otro tipo de andesitas y basaltos andesíticos, materiales pumíticos y depósitos cineríticos más o menos superficiales (White 1951 en Barrera 1968).

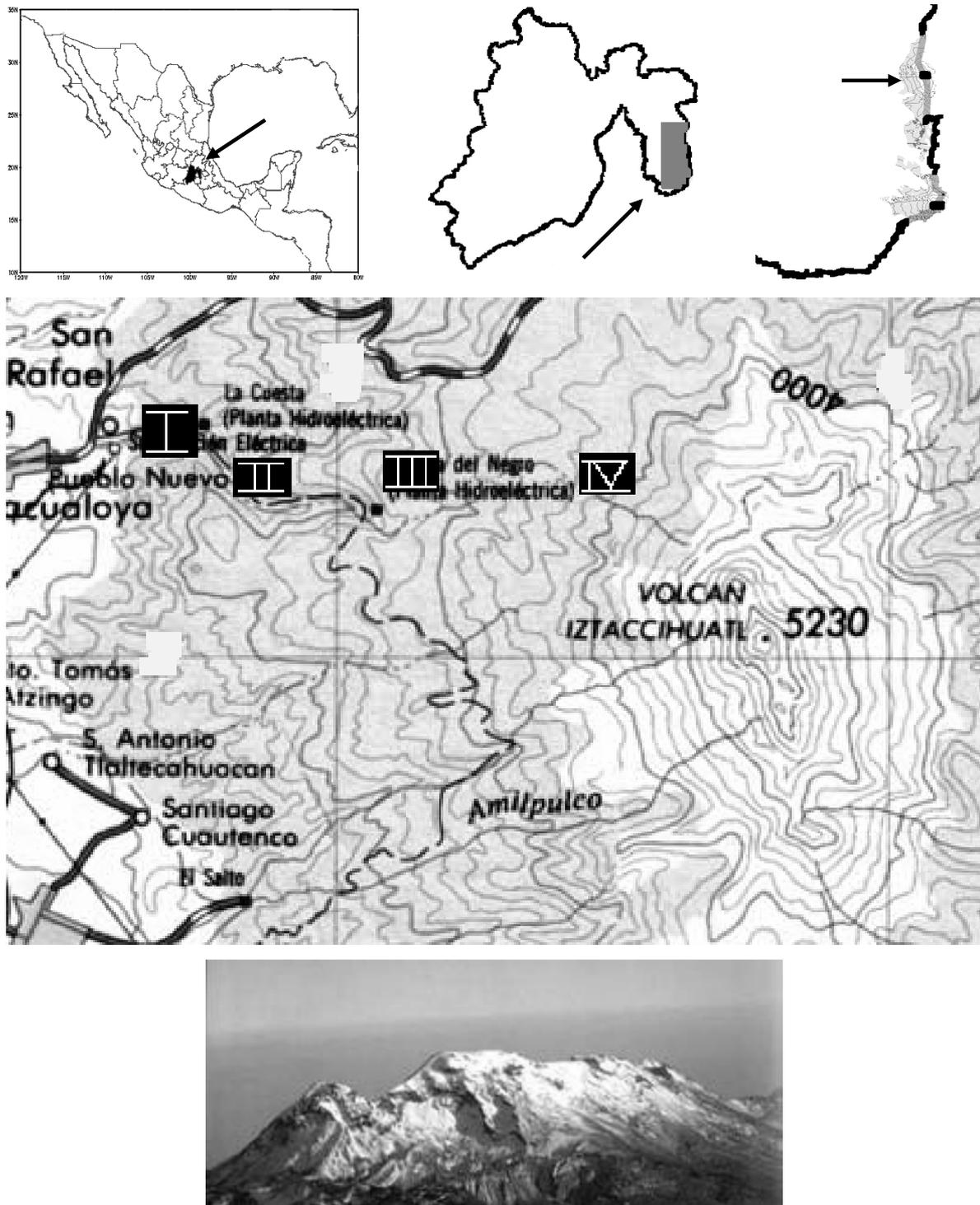


Figura 1.- Ubicación geográfica del Iztaccihuatl (modificado de Andalkar 2005). Los diferentes puntos señalan las zonas de colecta del presente trabajo: I= 2,753; II= 3,015; III= 3,250 y IV= 3,687 msnm.

2.3 Hidrología

Las cimas de ambas montañas están cubiertas de hielos y nieves perpetuos cuyo límite, en verano, está entre los 4,600 y los 4,700 m de altitud; la del Iztaccíhuatl está siendo erosionada por nueve pequeños glaciares, situados a altitudes que varían de los 5,286 a los 4,668 m (Lorenzo 1959).

Las faldas del macizo están surcadas por numerosas cañadas que se originan en la parte inferior de los casquetes. Los arroyos que las recorren en el vértice occidental, van a desembocar a los canales de la antigua zona lacustre de Chalco; al sur de dicho lugar, con excepción de la cañada de Nexpayantla, todas las corrientes contribuyen a formar el río Cuautla, a su vez tributario del Balsas. En la vertiente oriental sucede algo semejante; las corrientes del norte del macizo, corresponden a la cuenca del Río Atoyac; las australes, a la del río Nexapa, pero en este caso las dos son importantes tributarias del río Balsas (Barrera 1968). Las corrientes del noroeste desembocan en la Cascada de los Diamantes, siendo ésta de importancia para la comunidad de San Rafael por abastecerlo de agua.

2.4 Clima

Como señalan Miranda y Hernández (1963, en Barrera 1968), la red de observatorios meteorológicos en México no tiene la densidad necesaria para poder precisar los límites de los diversos tipos de clima. Además, ciertas clases de clima y muchas variaciones microclimáticas no son registradas en ningún observatorio. Ésto, desgraciadamente, es aplicable de igual forma al macizo y peor aún, ya que se han cerrado las estaciones meteorológicas que se encuentran alrededor del macizo, teniendo datos hasta el año de 1988 para la estación de Amecameca de Juárez, Amecameca; hasta 1987 para la estación de Río Frío, Ixtapalucan, y hasta 1985 para la estación de San Rafael Tlalmanalco (Fig. 2).

De la página del INEGI (2004) se obtuvieron los datos correspondientes a la precipitación media anual, siendo de 1,000 cm³, la temperatura media anual de 10 °C y, dependiendo la altitud, tiende a bajar hasta los 8 °C; el suelo es yermasol, además de encontrarse húmedos los 12 meses del año.

García (2004) propuso un sistema de clasificación climática, modificando al propuesto por Köppen, para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana.

Siguiendo la nomenclatura propuesta, la base de las laderas oriental y occidental del macizo, hasta los 2,500 m de altitud presentan un clima templado subhúmedo con

lluvias en verano, y un porcentaje de lluvias menor al 5% anual, denominado $C(w_2)(w)b$.

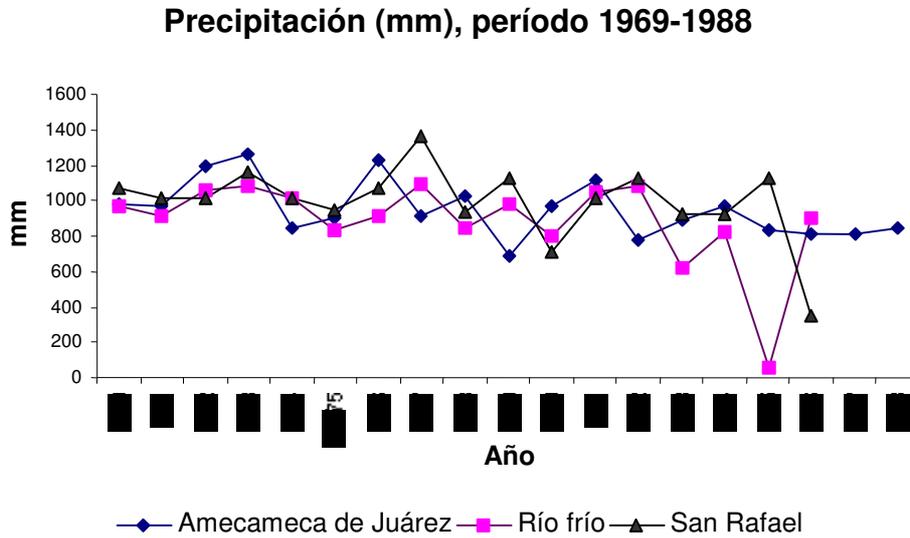


Figura 2. Datos de precipitación anuales de las estaciones: Amecameca, Río frío y San Rafael (Fuente: INEGI 2004).

El bosque de *Pinus montezumae* Lamb. y *Abies religiosa* (Kunth) Schtdl. & Cham. corresponde a una variante al tipo general Cb (templado con verano fresco largo), que tiene la característica de que la temperatura media anual es inferior a 12° C; a esta variante se le denomina “semifrío con verano fresco largo” y, puesto que coincide con el anterior, en cuanto al régimen de lluvias en verano, aunque con mayor precipitación, puede ser considerado dentro de los más húmedos de los subhúmedos y ser descrito como $C(w_2)(w)(b^)$.

En la zona de *Pinus hartwegii* Lindl. desde los 3,400 hasta cerca de los 4,000 m, se encuentra la faja del clima $C(w)(w)c$, descrito como semifrío húmedo, con verano fresco corto y lluvias en el verano, y un porcentaje de lluvia invernal menor de 5% anual.

Finalmente, de los 4,000 hasta los 5,386 m, encontramos del tipo E(T) que incluye a los climas fríos, y los EF, que son climas muy fríos (Barrera 1968).

2.5 Vegetación

El Iztaccíhuatl presenta una zona de glaciación alpina, la cual se encuentra entre la cumbre y los 4,500 m (Montero 2000). Posteriormente se encuentra *la tundra de*

montaña, que abarca de los 4,300 m hasta el límite de las nieves perpetuas, solamente se encuentran plantas herbáceas, siendo más frecuentes las gramíneas de los géneros *Festuca* y *Calamagrotis* en los lugares secos, y del género *Carex* en los más húmedos, además de líquenes.

La pradera alpina corresponde de los 3,800 - 4,000 hasta los 4,300 m se estratifica a su vez formando dos subpisos: uno superior, donde se encuentra una asociación de *Festuca livida* Willd. ex Spreng. y *Arenaria bryoides* Willd. ex Schlecht. En el subpiso inferior se establecen manchones de *Juniperus monticola* Martínez, y en ocasiones individuos de *Pinus hartwegii*, así como abundantes pastos; esta zona presenta erosión fluvial, por consiguiente la vegetación protege los suelos y le proporciona humedad.

El bosque donde predomina el *Pinus hartwegii*, se encuentra entre los 3,500 a los 3,800 m, de los 3,500 hasta los 3,400 m, dicho bosque se mezcla con *P. montezumae*, *Alnus firmifolia* Fernald y *Abies religiosa*.

De los 2,800 a los 3,400 m de altitud, el bosque está formado por macizos de *P. montezumae*, o por densas masas de *Abies religiosa*, las cuales raramente se entremezclan.

De los 2,300 a los 2,800 m. de altitud, la vegetación está constituida principalmente por encinares y, también, hacia el sur de la vertiente occidental, por bosque de *Cupressus lindleyi* Klotzsch ex End. En general, ésta última es notablemente pobre, en cambio, el del encinar, es relativamente rico y, de acuerdo a ciertas condiciones, deja prosperar algunos elementos del bosque caducifolio. Dentro de esta misma zona, y más específicamente en la ladera norte del Iztaccíhuatl, se presenta un bosque de mesófilo de montaña ya muy pobre (Miranda 1947), considerado por Rzedowski (1994) como un bosque de encinos muy deteriorado.

3 Antecedentes

La altitud es un factor importante en los patrones de distribución de los diferentes organismos. En general, se ha observado que conforme se aumenta la altitud disminuye la diversidad, como se presenta en plantas vasculares y aves. Sin embargo otros grupos taxonómicos se pueden mostrar patrones diferentes (Stevens 2002).

Por ejemplo, en pequeños mamíferos en Filipinas, Heaney (2001), estudió un gradiente altitudinal (950-1,250 m.), y encontró que la densidad aumenta conforme la altitud incrementa hasta el límite altitudinal de los 1,200 m, pasando este límite, la densidad comienza a decrecer.

En el caso de los artrópodos, O'Donnell y Kumar (2006) estudiaron la distribución altitudinal de hormigas de Costa Rica, registrando que a mayor altitud la densidad y diversidad de las especies disminuye.

Por otro lado, Sadaka y Ponge (2003), y Jing *et al.* (2005), trabajaron indirectamente con colémbolos en diferentes gradientes altitudinales, tanto en Marruecos como en el Tibet (China), respectivamente, encontrando un aumento en la densidad de organismos conforme aumenta la altitud en el muestreo, por lo menos hasta los 4,015 m snm en el caso del Tibet.

Pero además de los anteriores trabajos, se han llevado a cabo estudios de diversidad, con respecto a la altitud, sin encontrar diferencias entre los organismos muestreados (macroartrópodos) (Frouz *et al.* 2004).

En México, Palacios-Vargas (1985), trabajó en el volcán Popocatepetl, encontrando 28 géneros (Cuadro 2) en un muestreo anual. En los análisis altitudinales se tomaron todos los biotopos (suelo, hojarasca, musgos, rocas) en el muestreo, usando el porcentaje de permanencia y afinidad biocenótica, sin utilizar otro tipo de estadísticos.

Para el volcán Iztaccíhuatl, existen dos trabajos relacionados con Collembola. El primero, realizado por Cutz-Pool *et al.* (2008) en el cual, se estudiaron las agrupaciones de colémbolos corticícolas en el Iztaccíhuatl, tomando en cuenta un gradiente altitudinal de los 2,750 a los 3,250 m snm. Los resultados mostraron que la altitud afecta la estructura de la comunidad al disminuir la diversidad conforme aumenta la altitud, pasando lo contrario con la abundancia.

El segundo es un muestreo previo al presente trabajo, realizado en agosto del 2003, en los pisos altitudinales de 3,687; 3,250; 3,015 y 2,753 m snm.

Como resultado se obtuvieron 11 familias, 31 géneros (Cuadro 2) y 34 morfoespecies, de las cuales *Ceratophysella succinea*, *Mesaphorura florum* y *Megalothorax minimus* son las de más amplia distribución, encontrándose en tres de las cuatro zonas. En cambio, *Ptenothryx marmorata* se encontró sólo a los 2,753 m en el suelo, y *Ceratophysella denticulata* a los 3,250 m en la hojarasca.

Cuadro 2. Familias y géneros de colémbolos edáficos (2003) y corticícolas (Cutz-Pool *te al.* 2005), en la ladera noroeste del Iztaccíhuatl y el Popocatepetl (Palacios-Vargas 1985).

	Iztaccíhuatl			Popocatepetl		
	2003	2005	1985	2003	2005	1985
HYPOGASTRURIDAE						
<i>Hypogastrura</i>	X		X			
<i>Ceratophysella</i>	X		X			
<i>Schoettella</i>	X		X			
<i>Xenylla</i>	X	X	X			
<i>Willemia</i>	X		X			
ODONTELLIDAE						
<i>Odontella</i>			X			
<i>Xenyllodes</i>			X			
<i>Superodontella</i>	X					
BRACHYSTOMELLIDAE						
<i>Brachystomella</i>			X			
NEANURIDAE						
<i>Friesea</i>	X	X	X			
<i>Neanura</i>	X	X	X			
<i>Americanura</i>	X		X			
<i>Pseudachorutes</i>	X	X	X			
<i>Micranurida</i>	X		X			
ONYCHIURIDAE						
<i>Onychiurus</i>			X			
<i>Mesaphorura</i>	X		X			
<i>Metaphorura</i>	X					
<i>Protaphorura</i>	X					
ISOTOMIDAE						
<i>Isotomodes</i>			X			
<i>Proisotoma</i>	X		X			
<i>Cryptopygus</i>	X	X				
<i>Folsomia</i>	X					
<i>Folsomides</i>		X				
<i>Isotomurus</i>	X					
<i>Isotoma</i>	X		X			
<i>Pseudisotoma</i>		X	X			
ENTOMOBRYIDAE						
<i>Orchesella</i>						X
<i>Entomobrya</i>				X	X	
<i>Americabrya</i>				X	X	X
<i>Seira</i>				X	X	X
<i>Lepidocyrtus</i>				X		X
<i>Pseudosinella</i>				X		
<i>Willowsia</i>					X	
SMINTHURIDIDAE						
<i>Sminthurides</i>				X		
<i>Sphaeridia</i>				X		X
KATIANIDAE						
<i>Sminthurinus</i>				X	X	X
DICYRTOMIDAE						
<i>Dicyrtoma</i>						
<i>Ptenothrix</i>				X		X
SMINTHURIDAE						
<i>Sminthurus</i>				X		X
NEELIDAE						
<i>Neelus</i>				X		
<i>Megalothorax</i>				X		X
FAMILIAS				11	5	12
GENEROS				31	12	28

De forma general, el estudio mostró que la latitud y el biotopo no son factores determinantes para el establecimiento de los colémbolos, aunque particularmente para las familias Sminthurididae, Neelidae y Onychiuridae, las mayores densidades se

registraron en los pisos altitudinales más bajos, mientras que para la familia Sminthuridae la mayor densidad ocurre a los 3,753 m.

4 Objetivos

Principal:

Identificar la estructura comunitaria de los colémbolos, de la ladera noroeste del Volcán Iztaccíhuatl, en cuatro pisos altitudinales (3,687; 3,250; 3,015 y 2,753 m), además, establecer la relación de éste grupo con algunas propiedades edáficas (pH y porcentaje de carbono) y climáticas (humedad relativa, CO₂, y temperatura relativa).

Particulares:

Identificar si las comunidades de colémbolos son particulares para cada biotopo (hojarasca, suelo), o si existe una interacción entre comunidades.

Identificar si los diferentes factores climáticos pueden afectar la densidad y estructura de las asociaciones de los Collembola.

5 Hipótesis

1. El gradiente altitudinal es un parámetro importante en la distribución de los organismos. Estudios realizados en las distintas altitudes, muestran que los colémbolos se reparten de manera diferencial a lo largo de un gradiente altitudinal, registrando un mayor número de organismos conforme se incrementa dicho parámetro (Sadaka & Ponge 2003, Ping-Chun *et al.* 2005), por lo que la ladera del norte del Volcán Iztaccíhuatl, esperamos encontrar una mayor abundancia y diversidad a los 3,250 m donde se originan condiciones propicias para el establecimiento de distintas especies de colémbolos.
2. Los ecosistemas de montaña presentan una gran cantidad de hábitats dados por la heterogeneidad propia del sitio, en este caso el Iztaccíhuatl, de tal forma que las diferentes concentraciones de oxígeno y CO₂ tienden a cambiar a lo largo de un gradiente altitudinal, siendo menor el oxígeno conforme se incrementa la altitud (Loranger *et al.* 2004), esto es importante para los organismos de respiración cuticular, donde la disminución o aumento de dichos gases podrían ser limitantes para el ensamblaje de colémbolos, de tal forma que esperamos encontrar una mayor diversidad en los pisos intermedios, donde el bosque no se encuentra tal alterado.

6 Método

6.1 Zonas de colectas

Se realizaron cuatro expediciones a lo largo de un año: en noviembre del 2003, marzo, junio y agosto del 2004. En cada una de ellas se tomaron muestras a cuatro diferentes altitudes en la ladera noroeste del Iztaccíhuatl (Fig. 1), además, se registraron los datos de las coordenadas, el ángulo de la pendiente y el tipo de vegetación predominante, en cada uno de los sitios (Cuadro 3).

Cuadro 3.- Características de los cuatro pisos altitudinales, descripción de la vegetación, grado de la pendiente, coordenadas y altitud, donde se realizaron los diferentes muestreos de la ladera noroeste del Volcán Iztaccíhuatl.

Zona	Altitud m.	Coordenadas	Pendiente	Tipo de bosque.	Vegetación dominante.
I	2,753	19°12'40''N 98°44'2''W	29°	Bosque de encino.	<i>Quercus laurina</i> , <i>Buddleia cordata</i> , <i>Pinus</i> sp., <i>Cupressus</i> sp., <i>Smilax</i> sp. <i>Cucurbita</i> sp., <i>Berberis</i> <i>moranensis</i> , <i>Viburnum stenocalyx</i> y <i>Garrya laurifolia</i> .
II	3,015	19°12'30''N 98°43'41''W	36°	Bosque de encino.	<i>Quercus laurina</i> , <i>Q. magnolifolia</i> , <i>Pinus</i> sp., <i>Cupressus</i> sp. y <i>Smilax</i> sp.
III	3,250	19°12'16''N 98°42'54''W	33°	Bosque de Abies con pocos pinos.	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus</i> sp., <i>Cupressus lindeyi</i> , <i>Rodaldana</i> sp., <i>Senecio</i> sp. y <i>Habenaria</i> sp.
IV	3,687	19°12'6''N 98°41'25''W	35°	Bosque de pino con zacatonal.	<i>Pinus hartwegii</i> , <i>Lupinus montanus</i> y <i>Acyrium hypericoides</i>

6.2 Muestreo

Para el muestreo se seleccionó un cuadro de 20 X 1 m, en el que se ubicaron diez puntos al azar, tomando en cada uno una muestra de hojarasca y una de suelo, para un total de veinte muestras por altitud y 80 por fecha de colecta. Para este tipo de colecta se utilizaron nucleadores de plástico con medidas de 15 X 15 X 5 cm, con una área total de 225 cm².

Adicionalmente, en los puntos de colecta se tomaron 100 grs de suelo para determinar la humedad relativa, las muestras fueron secadas en una estufa a 105 °C durante 6 hrs (Van-Reeuwijk 2002). Además, se tomaron datos de humedad del ambiente, temperatura y cantidad de CO₂ a nivel del suelo, con un termo-hidrómetro (IAQ-Calc 8760y8762). Los datos registrados fueron considerados para los dos biotopos (suelo, hojarasca), a fin de realizar los análisis estadísticos.

6.3 Procesamiento de muestras biológicas

Una vez en el Laboratorio de Ecología y Sistemática de Microartrópodos de la Facultad de Ciencias, UNAM, las muestras se procesaron en embudos de Berlese-Tullgren durante un período de seis días (tres a temperatura ambiente y tres con una fuente de calor artificial).

Posteriormente se separaron y cuantificaron todos los organismos, a nivel de orden, bajo un microscopio estereoscópico Reichert, 0.7X to 4.2X 570.

En el caso de los colémbolos, se separaron en Poduromorpha, Neelipleona, Symphypleona y Entomobryomorpha. Una vez separados se elaboraron preparaciones semipermanentes con líquido de Hoyer para su determinación mediante las claves de Palacios-Vargas (1982), Mari-Mutt y Palacios-Vargas (1987), Christiansen y Bellinger (1998), Jordana *et al.* (1997), D'Haese (1998), Sánchez (1999) y Janssens (2007).

6.4 Procesamiento del suelo

En el laboratorio de Edafología “Nicolás Aguilera” de la Facultad de Ciencias, UNAM, se realizaron las determinaciones de humedad relativa, pH y porcentaje de carbono, mediante las técnicas de Van-Reeuwijk (2002).

6.5 Pruebas estadísticas.

Para evaluar la diversidad de especies en cada altitud y fecha de colecta se calcularon los índices de Shannon, comparándolos con una prueba de “t” con el ajuste de Bonferroni para comparaciones múltiples ($\alpha=0.004$) (Zar 1984, Magurran 1988, Howell 2002). También se estimó la equitatividad con el índice de Pielou, y se calculó el índice de dominancia de Simpson.

Para evaluar el efecto de las diferentes variables sobre la densidad de colémbolos, se utilizó un análisis de varías vías (ANOVA), los datos fueron normalizados mediante una transformación tipo $\sqrt{x+0.5}$ (Zar, 1984). También se realizaron correlaciones

múltiples para determinar la influencia de alguna o algunas variables sobre las densidades de colémbolos.

Las variables de análisis en el estudio son: altitud, fecha de colecta, temperatura, biotopo, CO₂, grado de la pendiente, humedad, pH-agua, pH-KCl y porcentaje de carbono. Además se realizó un coeficiente de similitud de Sørensen para determinar las zonas semejantes en espacio y tiempo. Los cálculos fueron realizados mediante el programa estadístico STATISTICA, Ver. 6.0 (StatSoft, 1995).

Finalmente, para evaluar la relación de las diferentes variables, sobre la abundancia de la fauna de las cuatro zonas, se utilizó un análisis de correspondencia canónica (CCA), dichos análisis se realizaron con el programa CANOCO Ver. 4 (Ter Braak y Smilauer, 1998).

7 Resultados

7.1 Abundancias y densidades de colémbolos edáficos de la ladera noroeste del Volcán Iztaccíhuatl

Durante las cuatro fechas de colecta se colectaron un total de 77,113 organismos, de los que 31.22 % pertenecen a los colémbolos (Fig. 2), los restantes incluyen anélidos, arácnidos, ácaros, isópodos, miriápodos, proturos, dipluros, tisanópteros, psocópteros, ortópteros, hemípteros, dípteros, coleópteros (adultos y larvas), entre otros.

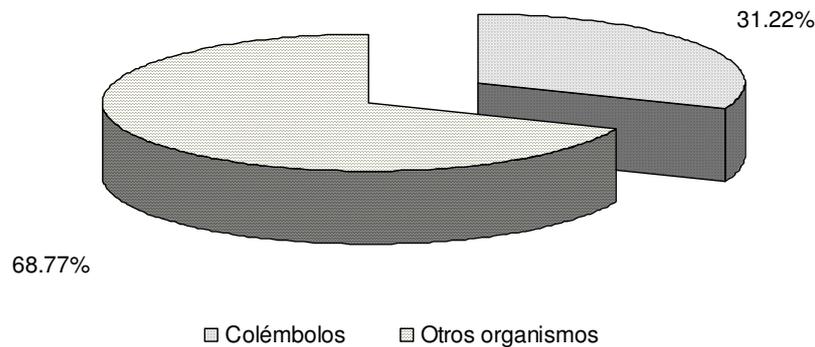


Figura. 2. Abundancia relativa de colémbolos y otros organismos encontrados en cuatro colectas en la ladera noroeste del Iztaccíhuatl.

En todo el estudio se encontraron 59,461 ind m^{-1} , y de cada fecha se obtuvieron las siguientes densidades: noviembre 7,052, marzo 6,918, junio 29,844 y agosto 15,503 ind m^{-1} . Los meses correspondientes a la temporada de lluvias (junio y agosto), registraron las mayores abundancias.

Los diferentes pisos altitudinales también presentaron diversas densidades las cuales fueron: piso I; 6,106, piso II; 18,788, piso III; 10,531 y piso IV; 20,893 ind m^{-1} (Fig. 3), encontrando la menor abundancia de organismos a menor altitud, y aumenta en los pisos superiores, pero esta manifestación no es continua ya que aumenta, disminuye y vuelve a aumentar.

Al analizar los diferentes pisos se encontró dos áreas que no interaccionan entre ellas, las cuales son el piso I y IV, en cambio el piso II interactúa con los pisos III y IV, y el piso III con el I y II.

Al término de las colectas se obtuvieron 12 familias de colémbolos que se distribuyen en 46 géneros, y 86 especies (cuadro 4 y 5). Las tres familias más

abundantes son: Isotomidae con 40.8 %, Hypogastruridae con el 19.9 % y Onychiuridae con el 11.9 % (Fig. 4).

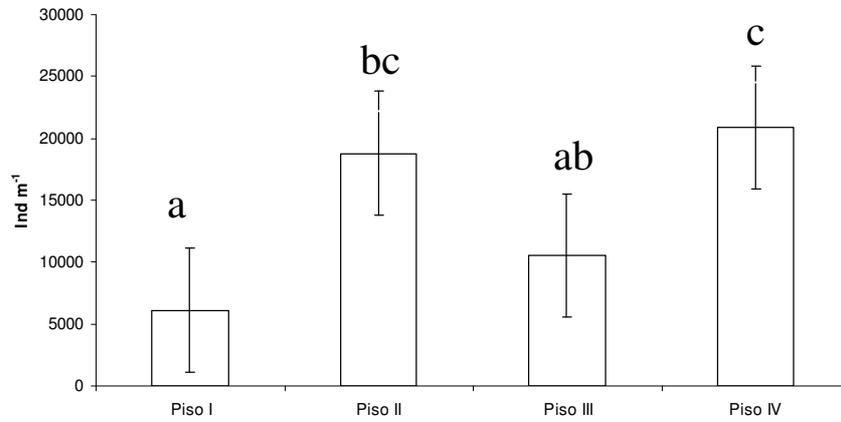


Figura 3. Densidad de colémbolos de cada piso altitudinal de la ladera noroeste del Volcán Iztaccíhuatl.

La familia con mayor número de especies es Isotomidae comprendidas en 12 géneros y 22 especies, seguida por Entomobryidae con 7 y 15 respectivamente, y en tercer lugar Hypogastruridae y Onychiuridae con 5 y 4 géneros y 8 especies, cada una.

A lo largo de las colectas las familias se presentaron con diferente abundancia, siendo agosto donde se localizaron once de las doce familias, y en las tres colectas restantes sólo se encontraron diez de ellas.

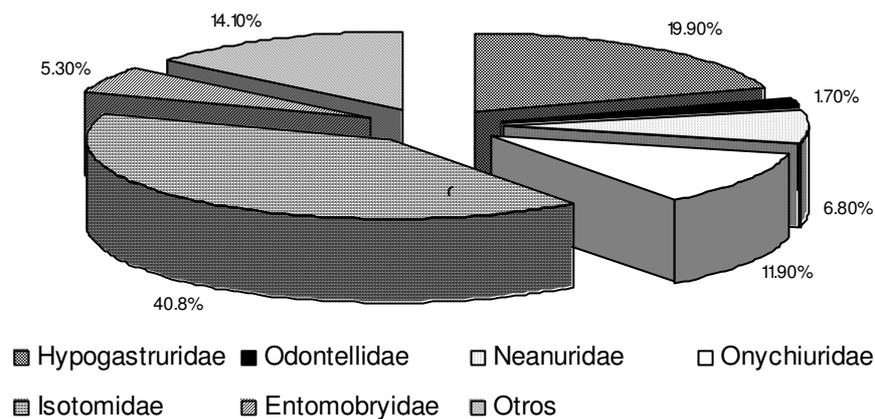


Figura 4. Porcentajes de las diferentes familias encontradas en la ladera noroeste del Volcán Iztaccíhuatl. Otros corresponden a Tomoceridae, Sminthuridae, Katiannidae, Dicyrtomidae, Sminthuridae y Neelidae.

Se encontró un mayor porcentaje de Neanuridae en noviembre, Odontellidae en marzo, Hypogastruridae para junio y de Tomoceridae en agosto, sin embargo

Isotomidae presentó un porcentaje similar de organismos a lo largo de las cuatro colectas (Fig. 5).

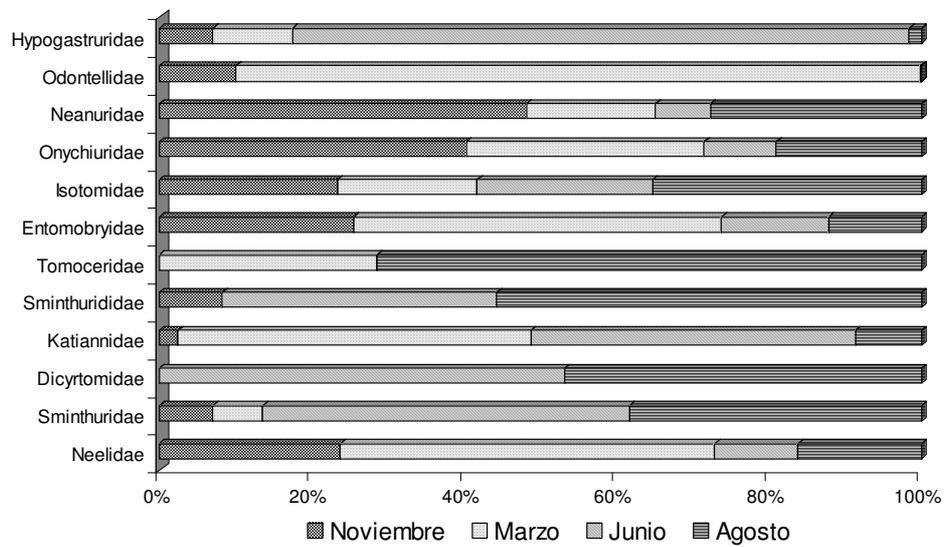


Figura 5. Porcentaje de las diferentes familias de colémbolos de las cuatro fechas de colecta del Volcán Iztaccíhuatl.

En noviembre se encontraron 35 géneros y 56 especies de las cuales *Stachiomella* sp, *Micranurida pygmaea*, *Proisotoma* ca. *frisoni*, *P.* ca. *sepulcralis*², *Ballistura* ca. *obtusicauda*, *Pseudosinella* ca. *hirsuta*, *P.* ca. *orba* y *P.* ca. *testa*, solo se observaron en este fecha.

Para marzo se obtuvieron 30 géneros y 48 especies, siendo exclusivas de esta fecha las siguientes especies: *Odontella* ca. *denticulata*, *Mesaphorura krausbaueri*, *Willowsia* ca. *nigromaculata* y *Sminthurus* ca. *fitchi*.

Las especies anteriores sólo estuvieron en épocas de secas, sobre todas las de marzo, ya que las lluvias se pueden alargar y presentarse en noviembre, a pesar de no ser este el caso.

Junio presentó 36 géneros y 55 especies, las especies exclusivas son: *Hypogastrura* ca. *hispanica*, *Ceratophysella* ca. *succinea*, *Protaphorura meridiata*, *Fissuraphorura* sp, *Isotomurus* ca. *palustroides*, *Sminthurinus* ca. *quadrimaculatus*, *S.* sp. y *Dicyrtoma* ca. *mithra*.

En agosto se extrajeron 37 géneros y 55 especies, entre ellos, *Hypogastrura* ca. *sensilis*, *Folsomides chichinautzini*, *Granisotoma communis* y *Sminthurus* ca. *lepus* sólo se encontraron en esta fecha (Cuadro 4), además de las especies mencionadas, se presentó la familia Dicyrtomidae como exclusiva de esta época.

Cuadro 4.- Lista taxonómica y densidad (ind m⁻¹ ± e.e.) de colémbolos de las cuatro colectas realizadas en la ladera noroeste del Volcán Iztaccíhuatl. Se encontraron dos especies cercanas a *Proisotoma sepulcralis*, las cuales se asignan con los índices, 1 y 2.

Especies \ localidad	Noviembre	Marzo	Junio	Agosto
Hypogastruridae				
<i>Hypogastrura ca. hispanica</i>			3±2	
<i>Hypogastrura ca. sensilis</i>				3±2
<i>Ceratophysella ca. brevis</i>			2292±1000	1±1
<i>Ceratophysella ca. denticulada</i>	32±12	51±41	6±3	
<i>Ceratophysella ca. succinea</i>			133±86	
<i>Schoettella ca. glasgowi</i>	2±2		52±23	13±12
<i>Willemia iztaccihuatlensis</i>	17±8	7±3	5±2	5±4
<i>Stenosgastrura sp.</i>		17±14		3±2
Odontellidae				
<i>Odontella ca. denticulada</i>		199±186		
<i>Superodontella ca. conglobata</i>	22±16	1±1		
<i>Superodontella ca. nana</i>		3±3	1±1	
<i>Stachiomella sp.</i>	1±1			
Neaniridae				
<i>Friesea Hoffmannorum</i>	211±64	64±20	141±35	306±87
<i>Neanura muscorum</i>	2±1	4±3	3±2	9±4
<i>Americanura ca. prima</i>	2±1		4±3	3±1
<i>Americanura ca. izabalana</i>	11±6	1±1	2±2	5±2
<i>Pseudachorutes ca. romeroi</i>	55±15	26±14	12±8	4±2
<i>Pseudachorutes ca. simples</i>		3±2	19±12	29±11
<i>Micranurida pygmaea</i>	3±2			
Onychiuridae				
<i>Protaphorura macrodentata</i>	1±1			2±2
<i>Protaphorura meridiana</i>			1±1	
<i>Mesaphorura floriae</i>	5±2	9±7	2±2	20±11
<i>Mesaphorura krausbaueri</i>		1±1		
<i>Mesaphorura macrochaeta</i>	240±46	242±51	318±121	251±79
<i>Mesaphorura yosiii</i>	61±33	6±5	52±26	82±57
<i>Metaphorura affinis</i>	84±38	41±18	14±6	52±26
<i>Fissuraphorura sp.</i>			1±1	
Isotomidae				
<i>Folsomides chichinautzini</i>				17±17
<i>Proisotoma ca. alticola</i>	20±8		232±107	98±82
<i>Proisotoma frisoni</i>	5±5			
<i>Proisotoma minuta</i>			8±6	7±5
<i>Proisotoma ca. sepulcralis</i> ¹	12±6	10±6	98±84	88±34
<i>Proisotoma ca. sepulcralis</i> ²	6±3			
<i>Proisotoma sp 1</i>	8±5			2±1
<i>Proisotoma sp 2</i>	4±4	1±1		
<i>Proisotoma sp 3</i>	1±1	3±3		
<i>Proisotoma sp 4</i>	3±3	2±2		
<i>Ballistura ca. abtusicauda</i>	2±2			
<i>Folsomina onychiurina</i>	26±15	19±12	5±5	14±9
<i>Clavisotoma ca. plicicauda</i>	1±1	8±7	21±13	29±20
<i>Hemisotoma thermophila</i>	40±20		70±70	78±40
<i>Isotomurus ca. palustroides</i>			21±13	
<i>Isotomurus ca. tricolor</i>	28±10		59±49	85±36
<i>Isotomiella minor</i>	12±5	7±7	17±12	10±6
<i>Isotoma ca. subviridis</i>	27±8	61±19	255±62	139±47
<i>Parisotoma ca. notabilis</i>	149±36	278±79	599±110	283±56
<i>Parisotoma ca. tariva</i>	128±39	51±27	79±27	34±15
<i>Desoria ca. flora</i>	121±45	13±6	1000±469	1069±405
<i>Granisotoma comuna</i>				1±1

Continuación del cuadro 4.

Especies \ localidad	Noviembre	Marzo	Junio	Agosto
Entomobryidae				
<i>Orchesella ca. folsomi</i>		3±2		2±1
<i>Americabrya arida</i>	12±4	78±17	21±14	19±8
<i>Entomobrya ca. triangularis</i>	19±6	24±7	74±19	42±10
<i>Entomobrya sp1</i>	4±3	2±2		
<i>Entomobrya sp2</i>	24±8	8±4		
<i>Entomobrya sp3</i>	18±12	41±23	86±39	14±6
<i>Willowsia mexicana</i>	3±1	29±8	5±3	2±2
<i>Willowsia ca. nigromaculata</i>		7±5		
<i>Seira purpurea</i>	1±1	1±1		
<i>Lepidocyrtus finus</i>	15±11	14±4	55±16	34±13
<i>Pseudosinella ca. dubia</i>		1±1	4±3	3±1
<i>Pseudosinella ca. hirsuta</i>	1±1			
<i>Pseudosinella ca. orba</i>	8±6			
<i>Pseudosinella ca. sexoculata</i>	9±6	6±3	24±10	5±3
<i>Pseudosinella ca. testa</i>	3±2			
Tomoceridae				
<i>Plutomurus ca. californicus</i>		1±1		3±2
Sminthuridae				
<i>Sminthurides ca. lepus</i>				8±4
<i>Sminthurides ca. occultus</i>	20±6			262±73
<i>Sminthurides sp.</i>	1±1		316±93	40±19
<i>Sphaeridia pumilis</i>	6±3		157±76	70±23
Katiannidae				
<i>Polikatianna ca. intermedia</i>	1±1	3±1	1±1	
<i>Sminthurinus ca. elegans</i>		9±5	26±13	5±4
<i>Sminthurinus ca. quadrimaculatus</i>			18±10	
<i>Sminthurinus sp.</i>			1±1	
Dicyrtomidae				
<i>Dicyrtoma ca. mitra</i>			1±1	
<i>Ptenothrix ca. atra</i>			1±1	3±2
<i>Ptenothrix ca. californica</i>			7±4	3±2
<i>Ptenothrix ca. renateae</i>			7±3	1±1
<i>Ptenothrix ca. texensis</i>			1±1	1±1
Sminthuridae				
<i>Sminthurus ca. eisenii</i>	3±1	4±2	184±40	78±23
<i>Sminthurus ca. incisus</i>	1±1		8±4	1±1
<i>Sminthurus ca. fitchi</i>		1±1		
<i>Sminthurus ca. sagittus</i>	2±1	1±1		
Neelidae				
<i>Neelus murinus</i>	4±2			15±5
<i>Neelides minutus</i>	7±5	15±14	2±2	13±4
<i>Megalothorax incertus</i>		1±1	13±10	16±9
<i>Megalothorax minimus</i>	87±15	182±50	175±41	101±27
Total	1587±564	1557±692	6715±2767	3488±1325
Especies	56	48	55	55

Las dos especies más abundantes, *Ceratophysella ca. brevis* y *Desoria ca. flora*, presentan su mayor abundancia en la época de lluvias.

De las 82 especies, 26 se encontraron en ambas épocas del año y en cada fecha de colecta, siendo generalistas, en relación a la humedad ambiental (Cuadro 4).

Por pisos altitudinales, también reconocemos diferentes asociaciones. En el caso del piso I, Onychiuridae presenta el más alto porcentaje de individuos, por otro lado Tomoceridae es exclusivo de dicha altitud (Fig. 6).

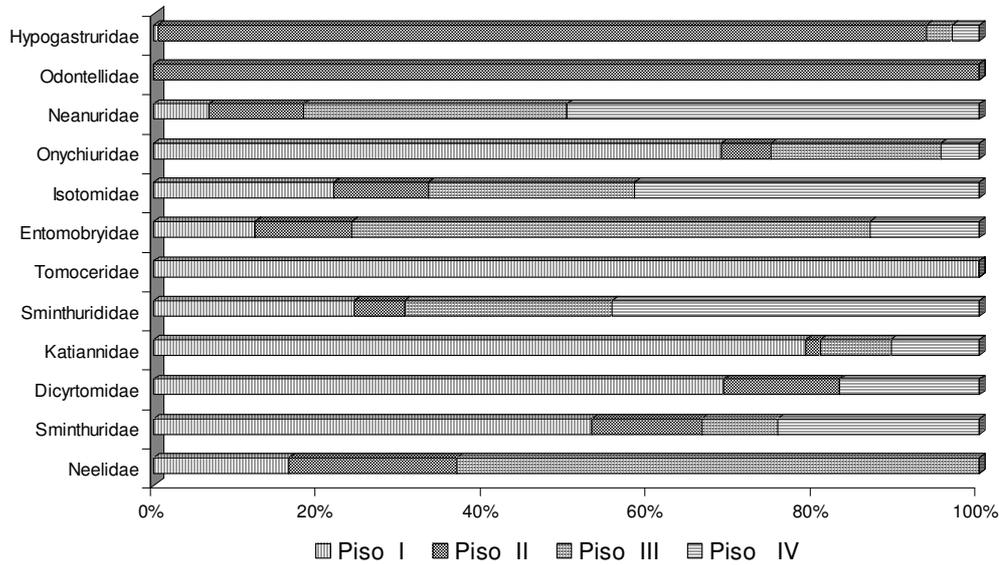


Figura 6. Porcentaje de las diferentes familias de colémbolos de los cuatro pisos altitudinales de la ladera noroeste del Volcán Iztaccíhuatl.

En el piso II, la mayor abundancia se encuentra en Hypogastruridae, mientras que, Odontellidae sólo se localizó en este sitio.

Para los pisos III y IV, Isotomidae tiene la mayor riqueza de especies, sin embargo Entomobryidae y Neanuridae, presentan el mayor porcentaje (Fig. 6).

De manera particular, en el piso I se obtuvieron 30 géneros y 45 especies de las cuales *Protaphorura macrodentata*, *P. meridiana*, *Folsomides chichinautzini*, *Ballistura ca. obtusicauda*, y *Plutomurus ca. californicus*, son exclusivas de dicha altitud (Cuadro 5).

En el piso II se encontraron 58 especies representados en 38 géneros, de las cuales: *Ceratophysella ca. succinea*, *Odontella ca. denticulata*, *Superodontella ca. conglobata*, *S. ca. nana*, *Stachiosmella sp.*, *Micranurida pygmaea*, *Mesaphorura krausbaueri*, *Fissuraphorura sp.* y *Dicyrtoma ca. mithra* sólo se les puede encontrar en dicha área.

Cuadro 5.- Lista taxonómica y densidad ($\text{ind m}^{-1} \pm \text{e.e.}$) de colémbolos de cuatro altitudes de la ladera noroeste del Volcán Iztaccíhuatl. Se encontraron dos especies cercanas a *Proisotoma sepulcralis*, las cuales se asignan con los índices, 1 y 2.

Especies \ localidad	Piso I (2,753 m)	Piso II (3,015 m)	Piso III (3,250 m)	Piso IV (3,687 m)
Hypogastruridae				
<i>Hypogastrura ca. hispanica</i>			3±1	
<i>Hypogastrura ca. sensilis</i>			2±2	1±1
<i>Ceratophysella ca. brevis</i>	3±2	2305±1000	9±6	9±8
<i>Ceratophysella ca. denticulata</i>		51±41	5±2	
<i>Ceratophysella ca. succinea</i>		133±86		
<i>Schoettella ca. glasgowi</i>				67±26
<i>Willemia iztaccihuatlensis</i>		2±1	16±7	15±6
<i>Stenosgastrura sp.</i>	3±2	14±13	2±1	
Odontellidae				
<i>Odontella ca. denticulata</i>		199±186		
<i>Superodontella ca. conglobata</i>		23±16		
<i>Superodontella ca. nana</i>		4±3		
<i>Stachiosmella sp.</i>		1±1		
Neaniridae				
<i>Friesea Hoffmannorum</i>	11±6	70±45	99±20	542±95
<i>Neanura muscorum</i>	16±6	2±1	1±1	
<i>Americanura ca. prima</i>		6±2	4±2	
<i>Americanura ca. izabalana</i>		4±2	14±6	1±1
<i>Pseudachorutes ca. romeroi</i>	6±3	34±14	39±12	19±12
<i>Pseudachorutes ca. simplex</i>	1±1	1±1	30±9	19±13
<i>Micranurida pygmaea</i>		3±2		
Onychiuridae				
<i>Protaphorura macrodentata</i>	3±1			
<i>Protaphorura meridiana</i>	1±1			
<i>Mesaphorura floriae</i>	10±4		24±12	2±2
<i>Mesaphorura krausbaueri</i>		1±1		
<i>Mesaphorura macrochaeta</i>	664±141	148±24	229±46	11±10
<i>Mesaphorura yosiii</i>	13±7	11±5	52±33	125±62
<i>Metaphorura affinis</i>	189±47	1±1		
<i>Fissuraphorura sp.</i>		1±1		
Isotomidae				
<i>Folsomides chichinautzini</i>	18±17			
<i>Proisotoma ca. alticola</i>	12±8		8±5	330±132
<i>Proisotoma frisoni</i>			5±5	
<i>Proisotoma minuta</i>				14±8
<i>Proisotoma ca. sepulcralis</i> ¹	97±83	26±11	85±34	1±1
<i>Proisotoma ca. sepulcralis</i> ²		5±3	1±1	
<i>Proisotoma sp 1</i>		3±2	6±5	1±1
<i>Proisotoma sp 2</i>			4±4	1±1
<i>Proisotoma sp 3</i>		4±3	1±1	
<i>Proisotoma sp 4</i>				4±3
<i>Ballistura ca. obtusicauda</i>	2±2			
<i>Folsomina onychiurina</i>	7±6	18±9	40±19	
<i>Clavisotoma ca. plicicauda</i>	6±5	44±22	10±8	
<i>Hemisotoma thermophila</i>	1±1		13±8	174±81
<i>Isotomurus ca. palustroides</i>				21±13
<i>Isotomurus ca. tricolor</i>	1±1	1±1	4±4	167±60
<i>Isotomiella minor</i>	31±13	13±5	2±2	
<i>Isotoma ca. subviridis</i>	287±60	39±15	41±16	115±46
<i>Parisotoma ca. notabilis</i>	207±52	549±92	549±99	5±3
<i>Parisotoma ca. tariva</i>	41±18	62±21	153±43	38±21
<i>Desoria ca. flora</i>				2203±593
<i>Granisotoma comuna</i>				1±1

Continuación del cuadro 5.

Especies \ localidad	Piso I (2,753 m)	Piso II (3,015 m)	Piso III (3,250 m)	Piso IV (3,687 m)
Entomobryidae				
<i>Orchesela ca. folsomi</i>	1±1	2±1	3±2	
<i>Americabrya arida</i>	22±8	16±4	54±16	38±15
<i>Entomobrya ca. triangularis</i>	21±6	34±7	70±19	33±9
<i>Entomobrya</i> sp1		3±2	3±3	
<i>Entomobrya</i> sp2	6±4	4±1	18±7	3±1
<i>Entomobrya</i> sp3		7±3	153±45	
<i>Willowsia mexicana</i>	13±5	22±7	4±2	1±1
<i>Willowsia ca. nigromaculata</i>	1±1			6±5
<i>Seira purpurea</i>		1±1		1±1
<i>Lepidocyrtus finus</i>		26±8	22±6	70±21
<i>Pseudosinella ca. dubia</i>		5±3	2±1	1±1
<i>Pseudosinella ca. hirsuta</i>			1±1	
<i>Pseudosinella ca. orba</i>			8±6	
<i>Pseudosinella ca. sexoculata</i>		8±4	37±11	
<i>Pseudosinella ca. testa</i>				3±2
Tomoceridae				
<i>Plutomurus ca. californicus</i>	4±2			
Sminthuridae				
<i>Sminthurides ca. lepus</i>		1±1	3±2	3±3
<i>Sminthurides ca. occultus</i>	11±6	32±12	20±6	220±74
<i>Sminthurides</i> Sp	6±4	16±8	82±30	253±92
<i>Sphaeridia pumilis</i>	109±74	18±8	47±18	59±23
Katiannidae				
<i>Polikatianna ca. intermedas</i>		1±1	2±1	2±1
<i>Sminthurinus ca. elegans</i>	36±14			4±4
<i>Sminthurinus ca. quadrimaculatus</i>	1±1	1±1	14±10	3±3
<i>Sminthurinus</i> sp.				1±1
Dicyrtomidae				
<i>Dicyrtoma ca. mithra</i>		1±1		
<i>Ptenothrix ca. atra</i>	3±2		1±1	
<i>Ptenothrix ca. californica</i>		3±2	2±2	5±3
<i>Ptenothrix ca. renatae</i>	7±3	1±1	1±1	1±1
<i>Ptenothrix ca. texensis</i>			1±1	
Sminthuridae				
<i>Sminthurus ca. eisenii</i>	99±33	44±14	21±10	107±31
<i>Sminthurus ca. incisus</i>	2±1	9±4		
<i>Sminthurus ca. fitchi</i>				1±1
<i>Sminthurus ca. sagittus</i>	2±1			2±1
Neelidae				
<i>Neelus murinus</i>	1±1	17±5	2±1	
<i>Neelides minutus</i>	2±2	27±15	9±3	
<i>Megalothorax incertus</i>	1±1	16±10	14±10	
<i>Megalothorax minimus</i>	75±14	144±28	327±60	1±1
Total	2049±4	4227±13	2369±3	4701±9
Especies	45	58	57	49

En del caso del piso III, se obtuvieron 30 géneros y 57 especies, siendo *Hypogastrura ca. hispanica*, *Proisotoma frisoni*, *Pseudosinella ca. hirsuta*, *P. ca. orba* y *Ptenothrix ca. texensis*, exclusivas de este sitio.

El piso IV presentó 29 géneros y 49 especies, entre estas, *Schoettella ca. glasgowi*, *Proisotoma minuta*, *P. sp 4*, *Isotomurus ca. palustroides*, *Desoria ca. flora*,

Granisotoma communa, *Pseudosinella ca. testa*, *Sminthurinus* Sp. y *Sminthurus ca. fitchi*, son exclusivas del piso.

En los pisos II y IV es donde se encontró la mayor abundancia, dada por la existencia de las dos especies con mayor presencia, siendo *Ceratophysella ca. brevis* y *Desoria ca. flora* (Cuadro 5).

Del total de especies, sólo 21 de ellas se obtuvieron en los cuatro pisos altitudinales, otras nueve se distribuyen desde el piso I hasta el III, y siete más desde el piso II hasta el IV (Cuadro 5). *Metaphorura affinis* y *Sminthurus ca. incisus*, se restringen en los pisos I y II..

Entre los pisos II y III hallamos preferentemente a *Ceratophysella ca. denticulata*, *Americanura ca. prima*, *Proisotoma ca. sepulcralis*², *P. sp 3*, *Entomobrya sp1*, *E. sp3* y *Pseudosinella ca. sexoculata*. Finalmente *Hypogastrura ca. sensilis* se distribuye entre los pisos III y IV.

7.1.1 Discusión

Al término de las colectas se encontró una gran abundancia de colémbolos del tanto espacial como temporalmente, con un decremento de estos organismos en la época de secas y un incremento en lluvias.

Rusek (1998) menciona que la abundancia y diversidad de Collembola se incrementa conforme aumenta la humedad, siendo ésto lo que se encontró a lo largo de las diferentes colectas, e inclusive sobrepasando (en porcentaje) a los oribátidos.

Jing *et al.* (2005) hacen mención de un aumento en la densidad de los diferentes organismos conforme se incrementa la altitud, hasta los 4,015 m. siendo en parte lo que se obtuvo en el presente trabajo, ya que de manera general existe un aumento en la densidad de organismos del el piso I al piso IV; pero a lo largo de este gradiente existen fluctuaciones, principalmente en el piso III, donde se aprecia una disminución de organismos en comparación al piso II y IV.

El piso III presenta una vegetación diversa y una pendiente no muy abrupta (Cuadro 3), de tal forma que la disminución de la abundancia de los diferentes organismos puede ser causa de otros factores bióticos, abióticos o la combinación de ambos, y no tanto por la altitud en que se encuentran los colémbolos.

Comparando con el trabajo de Cutz-Pool *et al.* (2005) (Cuadro 2), se encuentra un mayor número de familias (enfoca a organismos de musgos coticícolas, donde las condiciones ambientales varían considerablemente), ya que el hábitat edáfico (suelo y

hojarasca en conjunto) conforman un sitio donde las fluctuaciones de temperatura y humedad son más estables (Schowalter 2006), y por consiguiente ideal para el aumento de organismos a lo largo del año.

Comparando los resultados de este estudio, con el trabajo de Palacios-Vargas (1985) (Cuadro 2), del Popocatepetl, encontramos el mismo número de familias, pero un aumento considerable de géneros (47 vs. 28) y especies (86 vs. 38).

Esto puede deberse a la edad geológica de los dos volcanes ya que al ser más antiguo el Volcán Iztaccíhuatl, puede presentar ciertas especies relictas o en su caso especies que han evolucionado con presiones ambientales diferentes a las encontradas en el Popocatepetl, a pesar de presentar condiciones altitudinales semejantes.

Particularmente encontramos que los Isotomidae son la familia de mayor densidad poblacional, además de contar con el mayor número de géneros y especies, seguida por Entomobryidae, por lo que parece que los organismos de hábitos hemiedáficos presentan mejores adaptaciones al clima templado.

En el caso de los colémbolos de hábitos epiedáficos, se encontraron principalmente en los dos primeros pisos, lo que nos indica nuevamente de un factor externo, como la altitud, temperatura o humedad, para el establecimiento de los colémbolos, ya que el hábitat por si mismo no está funcionando como un factor determinante en el ensamblaje de los Collembola.

Hasegawa *et al.* (1996), encontraron que la composición de oribátidos se ve afectada conforme se aumenta la latitud, de igual forma ocurre con los colémbolos del Iztaccíhuatl los cuales presentan un conjunto de especies particulares, en cada pisos altitudinal.

Entre las especies encontradas, *Desoria ca. flora*, por su abundancia y presencia durante todo el año podría emplearse como indicador de altitud, principalmente del piso IV. Otro ejemplo sería Odontellidae, a las que se les halló exclusivamente en el piso II, aunque el deterioro que ha sufrido el bosque, pudo haber afectado la distribución de toda la familia.

Además, encontramos especies temporales, por ejemplo *Ceratophysella ca. brevis*, encontrada en todos los pisos altitudinales, pero sólo en época de lluvias.

También se registraron especies en tres de las cuatro altitudes, y no las encontramos en el piso II o en el III, llegando a concluir que en dichos pisos las condiciones bióticas, abióticas o interacción de ambas evitan su establecimiento.

7.2 Diversidad de colémbolos de la ladera noroeste del Volcán Iztaccíhuatl

Al analizar los resultados, se observa que noviembre presenta la mayor diversidad, para ambos índices (Shannon y Simpson), además se presentar una alta equitatividad; mientras que en junio se registraron los valores más bajos (Cuadro 6). Entre las diferentes fechas de colecta, no se encontraron diferencias significativas ($t_{0.01, 187}=2.71$, $p<0.05$). Además las especies más abundantes se encuentran en este mes, lo que nos indica que la humedad, siendo esta la época de lluvias, es importante para una alta abundancia de organismos, aunque la diversidad disminuya.

Cuadro 6. Índice de diversidad, por fechas de colecta, de colémbolos de la ladera noroeste del Volcán Iztaccíhuatl, México, (S = número de especies, H' = índice de Shannon, J' = equitatividad de Pielou, λ = índice de Simpson).

	Noviembre	Marzo	Junio	Agosto
S	56	48	55	55
H'	3.05	2.78	2.52	2.74
J'	0.75	0.72	0.63	0.68
λ	0.073	0.096	0.15	0.12
N1	21.11	16.14	12.5	15.63
N2	13.64	10.34	6.34	7.9

En el caso de las altitudes, encontramos al piso III como el más diverso, tanto para los índices de Shannon y de Simpson, y la mayor equitatividad el piso II (Cuadro 7).

Para las altitudes, sí se hallaron diferencias significativas entre los pisos II-III ($t_{0.01, 187} = 4.11$; $p < 0.05$) y entre III-IV ($t_{0.01, 187} = 3.8$; $p < 0.05$), de igual forma el piso II presenta la mayor abundancia de especies, pero los pisos II y IV demostraron una considerable disminución, de tal forma que se obtuvieron las diferencias significativas ya mencionadas.

Cuadro 7. Índice de diversidad, por pisos altitudinales, de colémbolos de la ladera noroeste del Volcán Iztaccíhuatl, México, (S = número de especies, H' = índice de Shannon, J' = equitatividad de Pielou, λ = índice de Simpson, N = abundancia de especies).

	Piso I (2,753 m)	Piso II (3,015 m)	Piso III (3,250 m)	Piso IV (3,687 m)
S	45	58	57	49
H'	2.43	1.98	2.88	2.11
J'	0.68	0.48	0.71	0.54
λ	0.15	0.32	0.09	0.24
N1	11.3	7.27	17.88	8.33
N2	6.51	3.11	10.14	4.04

Al revisar cada piso altitudinal con las fechas de colecta, se encontró al piso III siempre con los índices de diversidad más altos, tanto en la época de secas, como en lluvias.

En noviembre, marzo y agosto, el piso IV presenta las diversidades más bajas y de igual forma la equitatividad es baja. En junio el piso II es el que presenta los índices bajos (Cuadro 8).

Cuadro 8. Índice de diversidad, por pisos altitudinales en cada fecha de colecta, de colémbolos de la ladera noroeste del Volcán Iztaccíhuatl, México, (S = número de especies, H' = índice de Shannon, J' = equitatividad de Pielou, λ = índice de Simpson, N = abundancia de especies).

Fecha	Noviembre				Marzo				Junio				Agosto			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
S	28	34	34	26	23	29	25	15	25	31	28	24	28	27	35	31
H'	2.1	2.6	2.8	2.1	2.2	2.25	2.3	1.9	2.2	1.05	2.3	1.9	2.1	2.3	2.6	1.9
J'	0.6	0.75	0.79	0.6	0.7	0.6	0.72	0.7	0.68	0.3	0.7	0.6	0.63	0.71	0.75	0.5
λ	0.2	0.1	0.08	0.1	0.18	0.17	0.13	0.21	0.14	0.6	0.13	0.2	0.22	0.18	0.1	0.27
N1	8.2	14.2	16.5	8.8	9.0	9.4	10.3	6.7	9.1	2.8	10.7	6.9	8.3	10.4	14.8	6.8
N2	4.5	9.9	11.8	5.2	5.3	5.8	7.3	4.6	6.7	1.6	7.3	3.6	4.4	5.5	8.9	3.6

En tres de las cuatro fechas hay diferencias significativas entre los distintos pisos; en noviembre y agosto, estas se presentaron entre el I-III, en junio entre I-II, II-III y III-IV; sólo marzo no se evaluaron diferencias significativas (Cuadro 9).

Cuadro 9. Valor de *t* para la comparación entre los índices de diversidad de cuatro pisos altitudinales de la ladera noroeste del Volcán Iztaccíhuatl, México (* $p > 0.05$), g. l. = 3.02, con corrección de Bonferroni.

Colectas	Noviembre				Marzo				Junio				Agosto			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
I	-	3	*3.9	0.33	-	0.2	0.8	1.7	-	*6.1	1.1	1.5	-	1.2	*3.2	0.1
II		-	1.1	2.84		-	0.5	2.1		-	*6.8	*4.1		-	2.1	2.2
III			-	*3.9			-	2.7			-	0.1			-	*4.2
IV				-				-				-				-

7.2.1 Discusión

Tanto Rusek (1998), como O'Donell y Kumar (1996), mencionan que la diversidad de organismos aumenta conforme la humedad se incrementa, sin embargo, en el presente trabajo no ocurre lo mencionado, por lo menos en lo referente a la temporalidad, esto puede deberse a las diferentes condiciones de altitud y otras variables que juegan un papel importante, como pueden ser: temperatura, insolación, condiciones edáficas, entre otras.

Sin embargo, al analizar las fechas de colecta, se observó que en noviembre, y a pesar de dar inicio la época de secas, se encuentra una gran diversidad, lo que indica que los bosques templados, como el Iztaccíhuatl retienen por mucho más tiempo la humedad

ambiental, principalmente en suelo y hojarasca, de tal forma que la humedad promedio es prácticamente la misma tanto en julio como en agosto ($F_{(3,316)} = 499.9$; $p > 0.05$)

Otro punto importante es la capa de hojarasca que se encuentra en los diferentes puntos, y a pesar de no haber medido su profundidad, se puede inferir su importancia en este aspecto, ya que Cutz-Pool (2008) encontró una pérdida de humedad considerable de los musgos corticícolas, de tal forma que existe una migración vertical, de algunas especies, para protegerse de inclemencias ambientales, como pueden ser la insolación y la pérdida de humedad.

Con relación del efecto de la altitud sobre los colémbolos, hay diferentes resultados en cada piso, encontrando en el piso III la mayor diversidad, la que comparte elementos con el piso I, y presenta diferencias significativas para los pisos II y IV.

Estos resultados se deben principalmente a la baja dominancia, en los últimos pisos mencionados, en relación al tercero (Cuadro 7).

Observando con más detalle las diferentes áreas, se encontró que los sitios más diversos son aquellos de pendientes con menos inclinación, Cassange *et al.* (2004) encontraron lo mismo, en los Pirineos franceses donde el establecimiento y diversidad de colémbolos es mayor en sitios con pendientes poco pronunciadas; por consiguiente, el relieve, particularmente la pendiente es un buen indicador para la distribución de los colémbolos (Jensen *et al.* 1973), jugando un papel importante para la diversidad de organismos.

El piso altitudinal III, es importante para la diversidad de colémbolos, ya que en las cuatro fechas de colecta siempre se presentó con el de mayor índice (Cuadro 8).

El piso que le sigue en este aspecto, es el II (excepto en junio), donde se presentan los mayores grados de inclinación, y por ende el lavado constante de nutrientes, además de la pérdida de microartrópodos, debido a la acción mecánica del agua, por consiguiente es de considerar a la hojarasca como una variable importante, para la distribución de los colémbolos (Hou *et al.* 2005), dado por la hojarasca (Badejo *et al.* 1998), de cada tipo de bosque, así como por el aumento de la capa de hojarasca, donde su incremento se ve relacionado directamente con el aumento de humedad y de organismos (Irmeler 2006).

Por otro lado el tipo de vegetación, en cada zona, cambia drásticamente, de tal forma; en los dos primeros puntos encontramos un bosque de *Quercus laurina* y en el cuarto uno de *Pinus hartwegii*. El tercero, el de mayor diversidad, se encuentra un

bosque de *Abies religiosa* lo cual nos indica que el tipo de hojarasca es diferente y no tan gruesa como en los encinos o pinos.

El piso IV presenta una vegetación de tipo alpina, es decir los pinos ya se encuentran más dispersos y los zacatonales comienzan a dominar el paisaje y la diversidad es menor en este sitio, por consiguiente, las especies que se adaptaran favorablemente a un clima más agreste serán pocas y sólo algunas presentarán grandes densidades poblacionales como es el caso de *Desoria ca. flora*.

Como podemos observar el tipo de vegetación también es importante para la asociación de los colémbolos, sobre todo, el tipo de hojarasca que se encuentra depositada en el suelo, con lo cual se recomendaría realizar un estudio teniendo en cuenta este parámetro, el cual no se realizó en este trabajo, y al parecer es de suma importancia para la diversidad de los colémbolos.

Desde el punto de vista edafológico, los nutrimentos de cada tipo de vegetación, por la acción de la degradación de las hojas, son distintos; principalmente para el nitrógeno, carbono y lignina, entre otros componentes, (Scout & Binkey 1997), y de igual forma, estas disimilitudes se pueden encontrar en una misma vegetación por causa de la acción de la pendiente (Sariyildiz *et al.* 2005), por consiguiente la diversidad y abundancia de organismos también seguirá este comportamiento.

7.3 Efectos de la altitud, biotopo y fecha de colecta sobre los factores abióticos y densidades de los colémbolos

La altitud, biotopo y fecha de colecta, así como en las interacciones de altitud*biotopo, altitud*fecha de colecta, biotopo*fecha de colecta y el conjunto de todas las variables, muestran un efecto significativo sobre las variaciones de temperatura (Apéndice 1).

Como ya se mencionó, la relación a la altitud*fecha de colecta presenta un efecto con la temperatura, de tal forma, que en el mes de noviembre se observaron dos pisos contrastantes (I y IV) y los restantes presentan elementos compartidos por los anteriores (II y III); en marzo los pisos I y III presentan elementos similares, pero diferentes a los pisos II y IV, quienes presentan condiciones en común; en junio no se obtuvieron efectos significativos, pero en agosto el piso I es diferente a los pisos II-IV, estos últimos se comportan como un mismo piso (Fig.7).

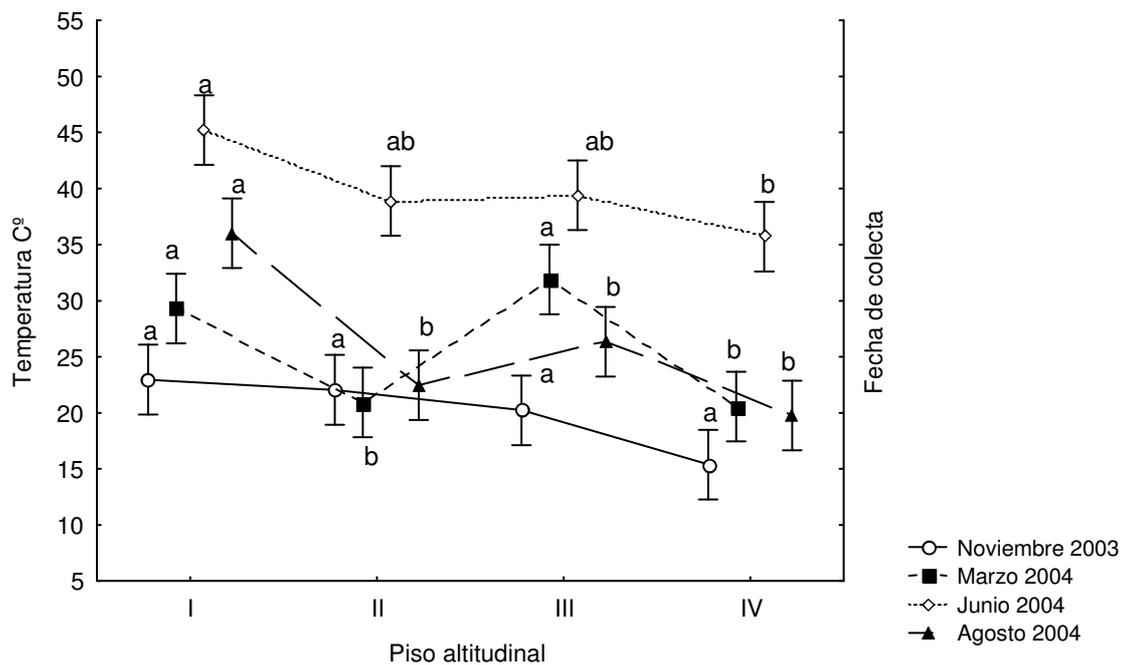


Figura 7. Temperatura promedio ($27.95 \pm e.e. 1.131$) de cuatro diferentes fechas de colecta en cuatro altitudes en la ladera NW del Iztaccíhuatl, Estado de México. Letras diferentes denotan diferencias significativas, para los pisos altitudinales, de acuerdo con la prueba *post hoc* de Tukey ($p < 0.005$).

La altitud, fecha de colecta y la interacción de ambos, presentan efectos significativos sobre las variaciones de la humedad ambiental, el CO₂, pH (real y potencial) y contenido de carbono. (Apéndice 1).

Para las fechas de colecta la humedad ambiental, presenta diferentes efecto en cada piso altitudinal, de tal forma tenemos que en noviembre, los pisos I, II y IV, son disímiles entre si, sólo I y III presentan similares efectos; para marzo los pisos I-II y III-IV tienen el mismo efecto, respectivamente, y entre estos dos grupos son desiguales; en junio se obtuvieron idénticos resultado para los pisos II-IV, siendo discrepante con relación al piso I; en agosto los pisos I, III y IV se encontraron disimilitudes y sólo en I y II similitudes (Fig. 8).

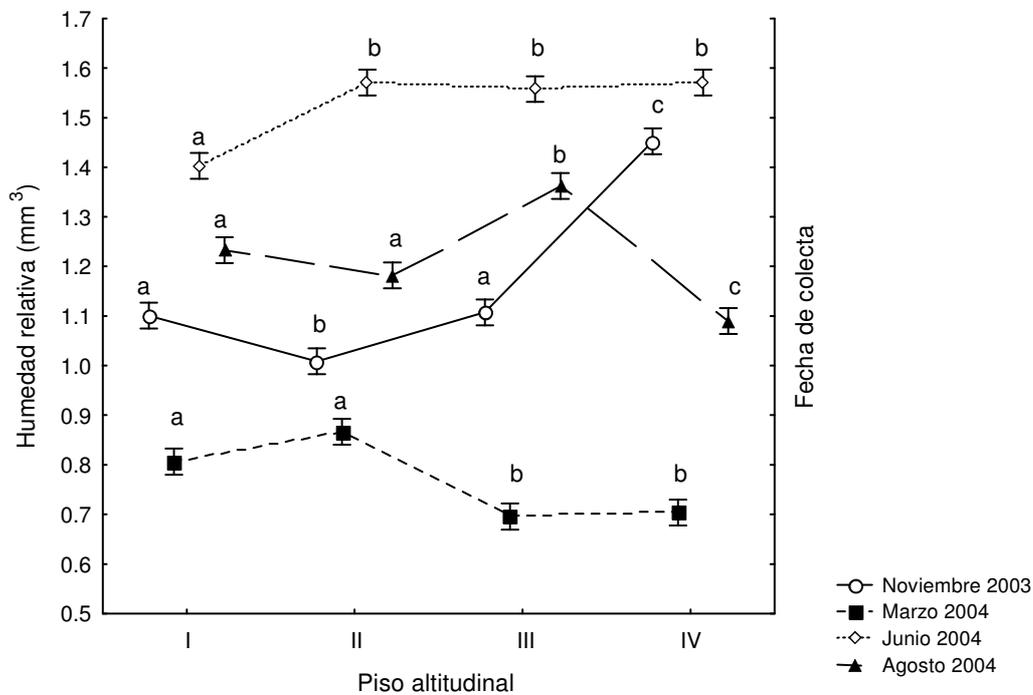


Figura 8. Humedad relativa de cuatro fechas diferentes en cuatro altitudes en la ladera NW del Iztaccíhuatl, Estado de México. Letras diferentes denotan diferencias significativas para las fechas de colecta, de acuerdo con la prueba *post hoc* Tukey ($p < 0.005$)

En el caso del CO₂, se encontraron diversos efectos en cada mes de colecta, excepto en marzo donde los pisos I y II presentan similitudes, siendo diferentes para los pisos restantes (Fig. 9).

Para el pH (real), el piso I y II es semejante, lo mismo que el III y IV, pero entre estos dos grupos no presentan semejanza, en el caso de noviembre; ya que en marzo los pisos I, II y IV son totalmente diferentes entre si, pero el III presenta elementos que se

comparten con los pisos III y IV; en junio no se presentan similitudes entre los pisos, en agosto también se presentan dos áreas una formada por los pisos I y III, y la segunda por II y IV

En casi todas las variables, excepto el biotopo, y la interacción de ellas se encontraron efectos significativos sobre las variaciones de densidad de colémbolos (Apéndice 1).

En noviembre, no se detectaron efectos entre los pisos; marzo presenta similitudes de los pisos I-II con respecto a los pisos III-IV, siendo este último par diferente entre ellos; Junio muestra efectos semejantes en I-III que difieren de los pisos II-IV los que son parecidos entre ellos; en agosto, los pisos I-II-III son semejantes y diferentes al piso IV (Fig. 10).

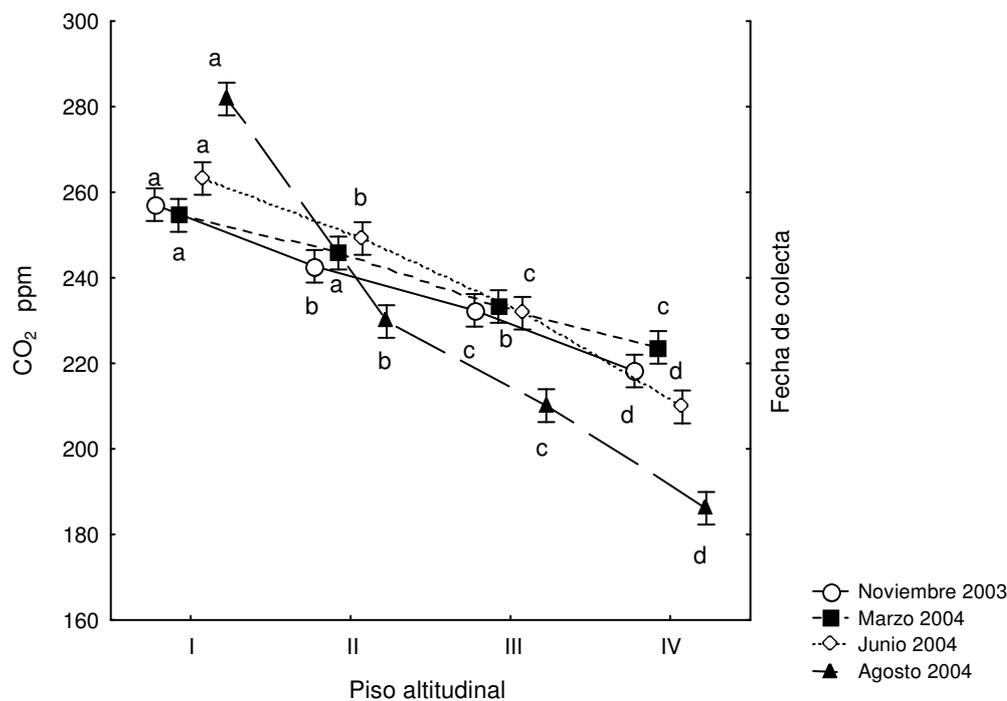


Figura 9. CO₂ (ppm), de cuatro fechas diferentes, en cuatro altitudes de la ladera NW del Iztaccíhuatl, Estado de México. Letras diferentes denotan diferencias significativas para las fechas de colecta, de acuerdo con la prueba *post hoc* Tukey ($p < 0.005$)

Para cada variable se presentan efectos significativos en la densidad poblacional de cada una de las especies. En el presente trabajo se tomaran en cuenta aquellas que no se encuentren en tres de las altitudes de forma consecutiva. Ésto para disminuir, lo más posible, los posibles errores de colecta, al no encontrarlas entre pisos.

Por otro lado, de cada especie se realizó un análisis *Post hoc* de Tukey, para encontrar con más exactitud las áreas que pueden compartir.

Son 21 especies las que se encuentran en todos los pisos (Cuadro 10), de estas, *Friesea Hoffmannorum* y *Sminithurides ca. occultus* mostraron efectos en todas las variables y sus interacciones.

En *Friesea hoffmannorum* se encontraron sitios similares en los meses de noviembre, junio y agosto, en los pisos I-III, los cuales son diferentes al IV, en cambio en marzo no se encuentran efectos significativos en alguna fecha.

En el caso de *Sminithurides ca. occultus*, noviembre, marzo y junio no presentan efectos, en cambio en agosto los pisos I-III son semejantes, pero diferentes al piso IV (Fig. 11).

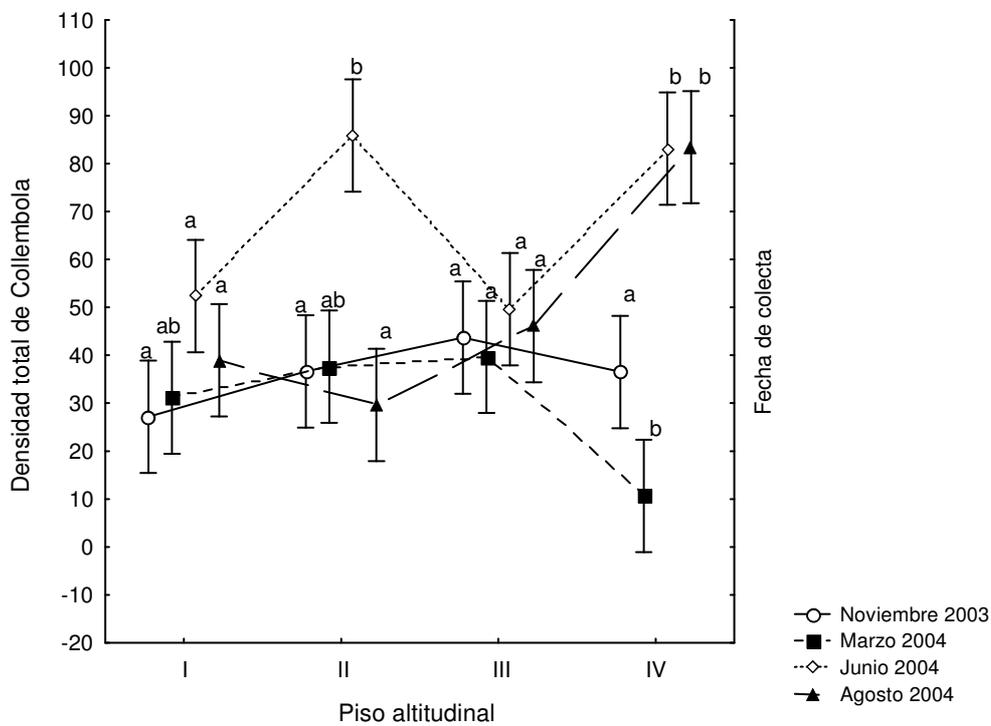


Figura 10. Densidad total de Collembola, de cuatro fechas diferentes, en cuatro altitudes de la ladera NW del Iztaccíhuatl, Estado de México. Letras diferentes denotan diferencias significativas para las fechas de colecta, de acuerdo con la prueba *post hoc* Tukey ($p < 0.005$)

Ceratophysella ca. brevis, *Pseudachorutes ca. romeroi*, *Willowsia mexicana*, y *Sminthurus ca. eisenii*, se obtuvieron diferencias significativas entre las fechas de colecta y no entre los pisos altitudinales, los cuales se comportan de manera semejante, excepto *C. ca. brevis* y *W. mexicana* quienes presentan disimilitudes en el piso II en marzo.

Mesaphorura macrochaeta, en noviembre se encontraron disimilitudes en el piso IV, los restantes tienen áreas compartidas, en los meses restantes, además el piso I es disímil a los otros pisos los cuales son semejantes entre sí.

Cuadro 10. Análisis de varianza (Anova) de tres vías, de 21 especies encontradas en los cuatro pisos altitudinales del Volcán Iztaccíhuatl, Estado de México (g. l. = grados de libertad, ** p < 0.005)

<i>Ceratophysella ca. brevis</i>			
Factor	g. l.	F	p
Altitud	3	10.49	**
Biotopo	1	0.76	n.s.
fecha de colecta	3	9.03	**
Altitud*Biotopo	3	0.65	n.s.
Altitud*fecha de colecta	9	8.93	**
Biotopo*fecha de colecta	3	1.40	n.s.
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	1.21	n.s.
<i>Friesea hoffmannorum</i>			
Altitud	3	61.14	**
Biotopo	1	20.98	**
fecha de colecta	3	5.65	**
Altitud*Biotopo	3	11.06	**
Altitud*fecha de colecta	9	6.51	**
Biotopo*fecha de colecta	3	12.24	**
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	5.44	**
<i>Pseudachorutes ca. romeroi</i>			
Altitud	3	3.11	**
Biotopo	1	1.21	n.s.
fecha de colecta	3	7.03	**
Altitud*Biotopo	3	0.68	n.s.
Altitud*fecha de colecta	9	2.40	**
Biotopo*fecha de colecta	3	2.54	n.s.
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	0.92	n.s.
<i>Mesaphorura macrochaeta</i>			
Altitud	3	34	**
Biotopo	1	36.19	**
fecha de colecta	3	0.31	n.s.
Altitud*Biotopo	3	11.91	**
Altitud*fecha de colecta	9	2.19	**
Biotopo*fecha de colecta	3	5.13	**
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	1.30	n.s.
<i>Mesaphorura yosiii</i>			
Altitud	3	4.96	**
Biotopo	1	0.28	n.s.
fecha de colecta	3	1.95	n.s.
Altitud*Biotopo	3	0.98	n.s.
Altitud*fecha de colecta	9	3.21	**
Biotopo*fecha de colecta	3	1.21	n.s.
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	0.91	n.s.
<i>Proisotoma ca. sepucralis</i>¹			
Altitud	3	2.89	**
Biotopo	1	1.23	n.s.
fecha de colecta	3	3.09	**
Altitud*Biotopo	3	2.91	**
Altitud*fecha de colecta	9	3.08	**
Biotopo*fecha de colecta	3	0.42	n.s.
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	1.98	n.s.

Continuación del cuadro 10.

<i>Isotomurus ca. tricolor</i>			
Factor	g. l.	F	p
Altitud	3	28.61	**
Biotopo	1	1.59	n.s.
fecha de colecta	3	5.27	**
Altitud*Biotopo	3	1.65	n.s.
Altitud*fecha de colecta	9	4.18	**
Biotopo*fecha de colecta	3	2.93	**
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	2.15	**
<i>Isotoma ca. subviridis</i>			
Altitud	3	25.37	**
Biotopo	1	0.03	n.s.
fecha de colecta	3	10.76	**
Altitud*Biotopo	3	2.88	**
Altitud*fecha de colecta	9	3.14	**
Biotopo*fecha de colecta	3	3.04	**
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	1.54	n.s.
<i>Parisotoma ca. notabilis</i>			
Altitud	3	36.45	**
Biotopo	1	0.01	n.s.
fecha de colecta	3	9.55	**
Altitud*Biotopo	3	0.03	n.s.
Altitud*fecha de colecta	9	2.24	**
Biotopo*fecha de colecta	3	12.98	**
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	3.05	**
<i>Parisotoma ca. tariva</i>			
Altitud	3	4.10	**
Biotopo	1	2.27	n.s.
fecha de colecta	3	3.43	**
Altitud*Biotopo	3	0.67	n.s.
Altitud*fecha de colecta	9	1.37	n.s.
Biotopo*fecha de colecta	3	0	n.s.
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	1.13	n.s.
<i>Americabrya arida</i>			
Altitud	3	3.12	**
Biotopo	1	18.39	**
fecha de colecta	3	18.84	**
Altitud*Biotopo	3	1.88	n.s.
Altitud*fecha de colecta	9	3.14	**
Biotopo*fecha de colecta	3	0.55	n.s.
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	1.67	n.s.
<i>Entomobrya ca. triangularis</i>			
Altitud	3	2.30	n.s.
Biotopo	1	4.87	**
fecha de colecta	3	5.85	**
Altitud*Biotopo	3	2.34	n.s.
Altitud*fecha de colecta	9	4.08	**
Biotopo*fecha de colecta	3	1.20	n.s.
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	1.17	n.s.
<i>Entomobrya sp2.</i>			
Altitud	3	2.47	**
Biotopo	1	1.52	n.s.
fecha de colecta	3	11.77	**
Altitud*Biotopo	3	4.99	**
Altitud*fecha de colecta	9	4	**
Biotopo*fecha de colecta	3	6.73	**
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	2.38	**

Continuación del cuadro 10.

<i>Willowsia mexicana</i>			
Factor	g. l.	F	p
Altitud	3	7.62	**
Biotopo	1	0.41	n.s.
fecha de colecta	3	13.23	**
Altitud*Biotopo	3	2.51	n.s.
Altitud*fecha de colecta	9	3.32	**
Biotopo*fecha de colecta	3	2.03	n.s.
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	1.41	n.s.
<i>Sminthurides ca. occultus</i>			
Altitud	3	29.27	**
Biotopo	1	40.70	**
fecha de colecta	3	73.21	**
Altitud*Biotopo	3	6.08	**
Altitud*fecha de colecta	9	21.81	**
Biotopo*fecha de colecta	3	27.10	**
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	6.45	**
<i>Sminthurides sp. 1</i>			
Altitud	3	15.84	**
Biotopo	1	0.28	n.s.
fecha de colecta	3	41.51	**
Altitud*Biotopo	3	3.71	**
Altitud*fecha de colecta	9	10.39	**
Biotopo*fecha de colecta	3	0.06	n.s.
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	4.17	**
<i>Sphaeridia pumilis</i>			
Altitud	3	0.60	n.s.
Biotopo	1	15.45	**
fecha de colecta	3	8.12	**
Altitud*Biotopo	3	0.20	n.s.
Altitud*fecha de colecta	9	1.65	n.s.
Biotopo*fecha de colecta	3	5.44	**
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	1.12	n.s.
<i>Sminthurinus ca. quadrimaculatus</i>			
Altitud	3	1.18	n.s.
Biotopo	1	0.01	n.s.
fecha de colecta	3	6.02	**
Altitud*Biotopo	3	0.77	n.s.
Altitud*fecha de colecta	9	1.18	n.s.
Biotopo*fecha de colecta	3	0.01	n.s.
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	0.77	n.s.
<i>Ptenothrix ca. renateae</i>			
Altitud	3	4.40	**
Biotopo	1	6.53	**
fecha de colecta	3	7.15	**
Altitud*Biotopo	3	1.69	n.s.
Altitud*fecha de colecta	9	3.68	**
Biotopo*fecha de colecta	3	3.61	**
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	1.37	n.s.
<i>Sminthurus ca. eisenii</i>			
Altitud	3	6.39	**
Biotopo	1	2.07	n.s.
fecha de colecta	3	31.06	**
Altitud*Biotopo	3	2.50	n.s.
Altitud*fecha de colecta	9	3.95	**
Biotopo*fecha de colecta	3	2.54	n.s.
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	1.32	n.s.

Continuación del cuadro 10.

<i>Megalothorax minimus</i>				
Factor	g. l.	F	p	
Altitud	3	42.28	**	
Biotopo	1	5.56	**	
fecha de colecta	3	1.5	n.s.	
Altitud*Biotopo	3	1.98	n.s.	
Altitud*fecha de colecta	9	1.90	n.s.	
Biotopo*fecha de colecta	3	21.73	**	
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	5.33	**	

En *Mesaphorura yosiii*, las diferencias se encuentran en el piso IV para la época de lluvias.

*Proisotoma ca. sepulcralis*¹, presento áreas desiguales en el piso III, en agosto.

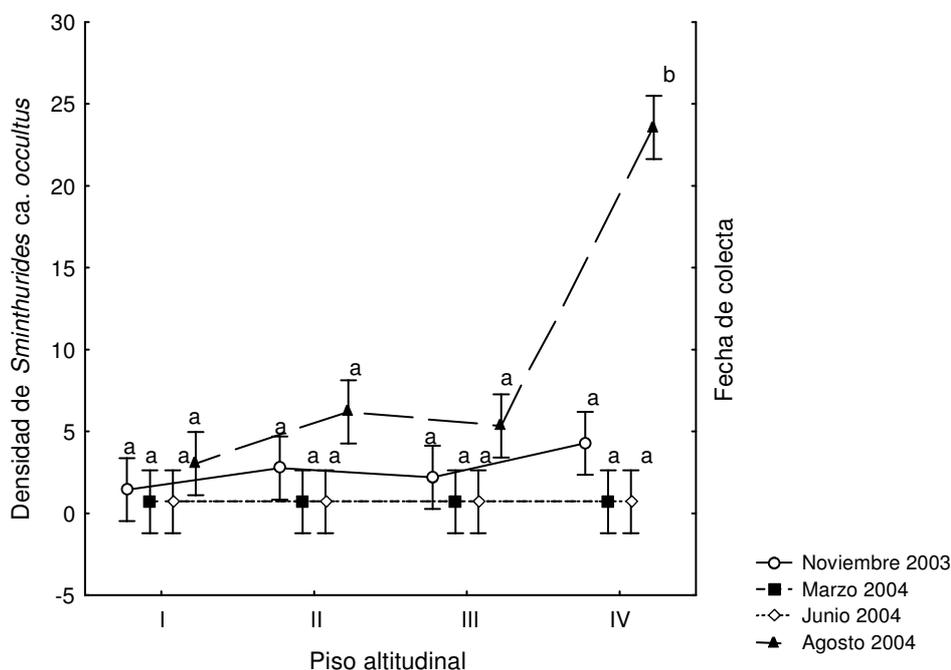


Figura 11. Densidad de *Sminthurides ca. occultus*, de cuatro fechas diferentes, en cuatro altitudes de la ladera NW del Iztaccíhuatl, Estado de México. Letras diferentes denotan diferencias significativas para las fechas de colecta, de acuerdo con la prueba *post hoc* Tukey ($p < 0.005$)

En *Isotomurus ca. tricolor* (Fig. 12) e *Parisotoma ca. notabilis*, se obtuvieron diferencias, en el piso IV en noviembre, junio y agosto.

Para *Isotoma ca. subviridis*, las diferencias están en el piso I en marzo y junio.

En *Parisotoma ca. tariva*, *Americabrya arida* y *Sphaeridia pumilis*, se muestran disimilitudes entre las fechas de colecta y no entre los pisos altitudinales.

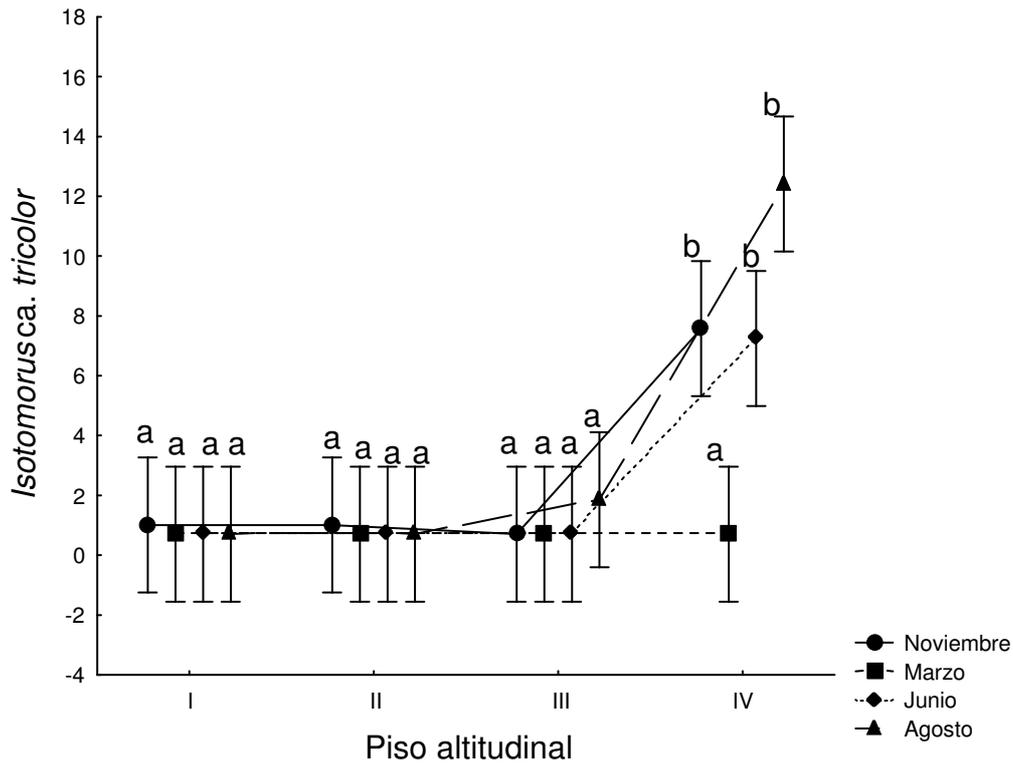


Figura 12. Densidad de *Isotomurus ca. tricolor*, de cuatro fechas diferentes, en cuatro altitudes de la ladera NW del Iztaccíhuatl, Estado de México. Letras diferentes denotan diferencias significativas para las fechas de colecta, de acuerdo con la prueba *post hoc* Tukey ($p < 0.005$)

Para *Entomobrya ca. triangularis*, las discrepancias se muestran en junio, en el piso III, en relación al I y IV; en agosto se presentó en el piso IV, en relación a los pisos I y II.

En el caso de *Entomobrya sp. 2*, las disimilitudes fueron en noviembre en el piso II.

Para *Sminthurides sp. 1*, noviembre presentó diferencias en los pisos III y IV, los cuales son diferentes entre ellos y con los restantes, los cuales presentan elementos que comparten (Fig. 13).

En *Sminthurinus ca. quadrimaculatus*, las discordancias se encuentran en el piso III.

En el caso de *Ptenothrix ca. renatae*, junio presenta divergencia en el piso I.

Para *Megalothorax minimus*, En noviembre se aprecian dos grupos, el primero formado por los pisos I y IV, y un segundo formado por II y III; en marzo y agosto, el piso III es diferente a los restantes; para junio los pisos I y II forman un conjunto, el III es discordante a ellos y el IV no comparte elementos con los anteriores (Fig. 14).

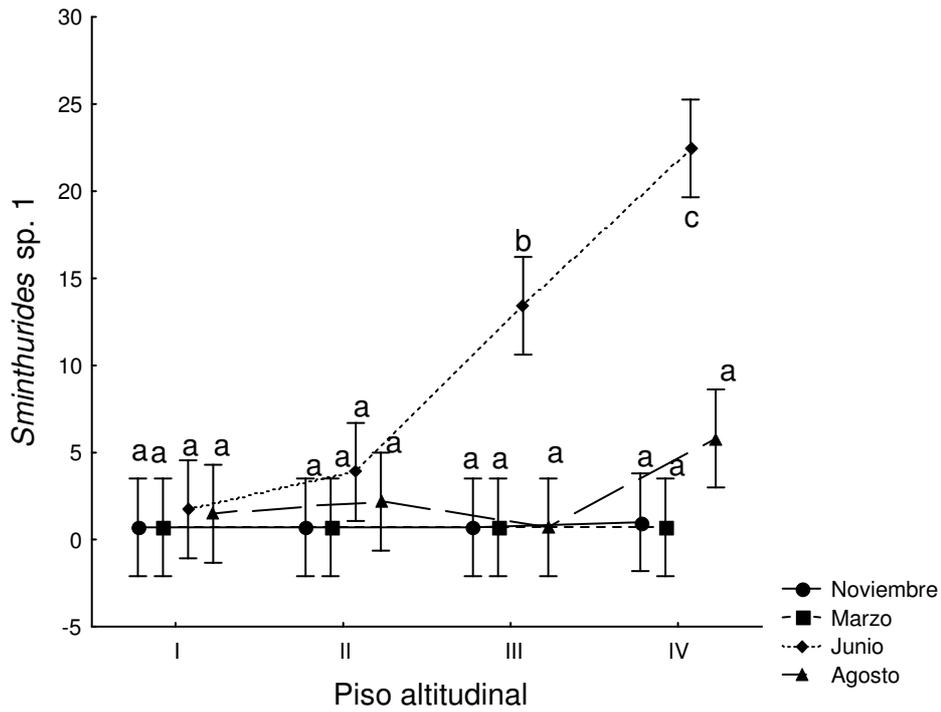


Figura 13. Densidad de *Sminthurides sp. 1*, de cuatro fechas diferentes, en cuatro altitudes de la ladera NW del Iztaccíhuatl, Estado de México. Letras diferentes denotan diferencias significativas para las fechas de colecta, de acuerdo con la prueba *post hoc* Tukey ($p < 0.005$)

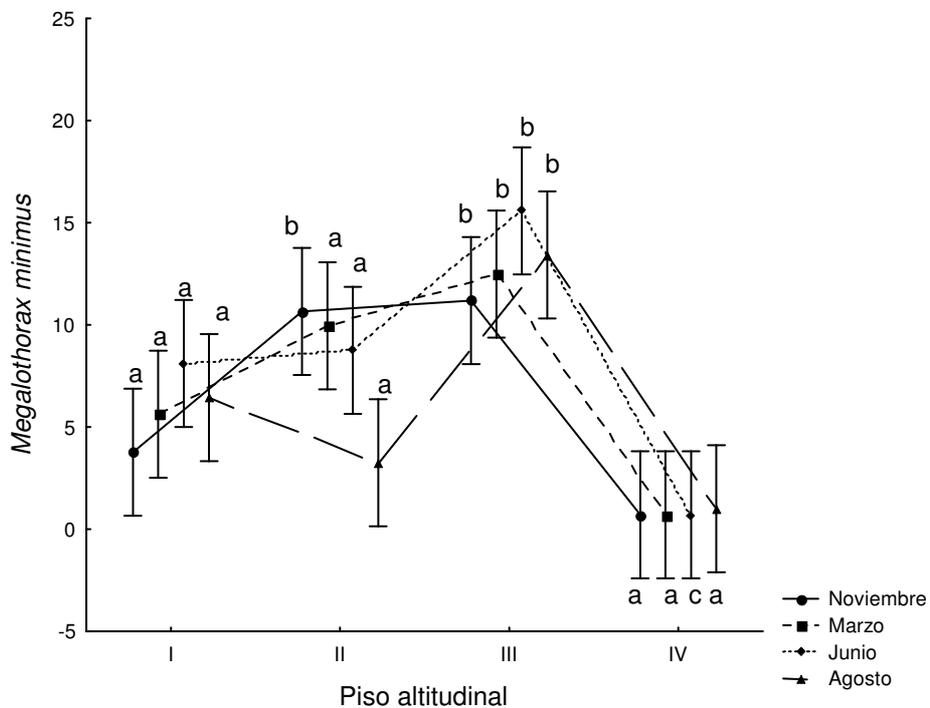


Figura 14. Densidad de *Megalothorax minimus*, de cuatro fechas diferentes, en cuatro altitudes de la ladera NW del Iztaccíhuatl, Estado de México. Letras diferentes denotan diferencias significativas para las fechas de colecta, de acuerdo con la prueba *post hoc* Tukey ($p < 0.005$)

Las especies que se encuentran entre los pisos I-III son nueve, las cuales se muestran en el siguiente cuadro 11.

Cuadro 10. Análisis de varianza (Anova) de tres vías de 9 especies encontradas entre en los pisos altitudinales I-III del Volcán Iztaccíhuatl, Estado de México (g. l. = grados de libertad, $p < 0.005$)

<i>Stenosgastrura sp.</i>			
Factor	g. l.	F	p
Altitud	3	0.57	n.s.
Biotopo	1	0.66	n.s.
fecha de colecta	3	2.03	n.s.
Altitud*Biotopo	3	1.94	n.s.
Altitud*fecha de colecta	9	1.48	n.s.
Biotopo*fecha de colecta	3	3.41	**
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	1.03	n.s.
<i>Neanura muscorum</i>			
Altitud	3	8.58	**
Biotopo	1	0	n.s.
fecha de colecta	3	1.40	n.s.
Altitud*Biotopo	3	0.23	n.s.
Altitud*fecha de colecta	9	1.51	n.s.
Biotopo*fecha de colecta	3	1.18	n.s.
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	0.51	n.s.
<i>Folsomia onychiurina</i>			
Altitud	3	2.73	**
Biotopo	1	5.07	**
fecha de colecta	3	0.93	n.s.
Altitud*Biotopo	3	2.16	n.s.
Altitud*fecha de colecta	9	0.98	n.s.
Biotopo*fecha de colecta	3	2.57	n.s.
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	0.63	n.s.
<i>Clavisotoma ca. plicicauda</i>			
Altitud	3	3.27	**
Biotopo	1	3.96	**
fecha de colecta	3	1.04	n.s.
Altitud*Biotopo	3	4.46	**
Altitud*fecha de colecta	9	0.73	n.s.
Biotopo*fecha de colecta	3	1.11	n.s.
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	0.60	n.s.
<i>Isotomiella minor</i>			
Altitud	3	4.39	**
Biotopo	1	6.39	**
fecha de colecta	3	0.38	n.s.
Altitud*Biotopo	3	1.69	**
Altitud*fecha de colecta	9	0.65	n.s.
Biotopo*fecha de colecta	3	0.88	n.s.
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	0.26	n.s.
<i>Orchesela ca. folsomi</i>			
Altitud	3	0.77	n.s.
Biotopo	1	4.31	**
fecha de colecta	3	1.44	n.s.
Altitud*Biotopo	3	0.77	n.s.
Altitud*fecha de colecta	9	0.97	n.s.
Biotopo*fecha de colecta	3	1.44	n.s.
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	0.97	n.s.

Continuación cuadro 11.

<i>Neelus murinus</i>			
Factor	g. l.	F	p
Altitud	3	14.96	**
Biotopo	1	1.1	n.s.
fecha de colecta	3	12.31	**
Altitud*Biotopo	3	1.53	n.s.
Altitud*fecha de colecta	9	7.47	**
Biotopo*fecha de colecta	3	0.36	n.s.
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	0.89	n.s.
<i>Neelides minutus</i>			
Altitud	3	4.56	**
Biotopo	1	0.13	n.s.
fecha de colecta	3	2.27	n.s.
Altitud*Biotopo	3	0.5	n.s.
Altitud*fecha de colecta	9	1.87	n.s.
Biotopo*fecha de colecta	3	0.97	n.s.
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	0.89	n.s.
<i>Megalothorax incertus</i>			
Altitud	3	2.88	**
Biotopo	1	3.74	n.s.
fecha de colecta	3	2.81	**
Altitud*Biotopo	3	2.44	n.s.
Altitud*fecha de colecta	9	2.70	**
Biotopo*fecha de colecta	3	1.89	n.s.
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	1.62	n.s.

En los pisos II-IV encontramos seis especies, mostradas en el cuadro 12.

Cuadro 12. Análisis de varianza (Anova) de tres vías de 6 especies encontradas entre en los pisos altitudinales II-IV del Volcán Iztaccíhuatl, Estado de México (g. l. = grados de libertad, $p < 0.005$)

<i>Willemia iztahuatlensis</i>			
Factor	g. l.	F	p
Altitud	3	6.05	**
Biotopo	1	7.89	**
fecha de colecta	3	1.11	n.s.
Altitud*Biotopo	3	2.20	**
Altitud*fecha de colecta	9	1.23	n.s.
Biotopo*fecha de colecta	3	0.40	n.s.
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	0.75	n.s.
<i>Americanura ca. izabalana</i>			
Altitud	3	6.78	**
Biotopo	1	0.21	n.s.
fecha de colecta	3	3.08	**
Altitud*Biotopo	3	0.64	n.s.
Altitud*fecha de colecta	9	1.29	n.s.
Biotopo*fecha de colecta	3	3.42	**
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	2.61	**

Continuación cuadro 12.

<i>Lepiducyrtus finus</i>			
Factor	g. l.	F	p
Altitud	3	9.29	**
Biotopo	1	5.79	**
fecha de colecta	3	5.74	**
Altitud*Biotopo	3	1.61	n.s.
Altitud*fecha de colecta	9	2.5	**
Biotopo*fecha de colecta	3	3.01	**
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	0.5	n.s.
<i>Sminthurides ca. lepus</i>			
Altitud	3	0.92	n.s.
Biotopo	1	0.45	n.s.
fecha de colecta	3	4.8	**
Altitud*Biotopo	3	0.84	n.s.
Altitud*fecha de colecta	9	0.92	n.s.
Biotopo*fecha de colecta	3	0.45	n.s.
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	0.84	n.s.
<i>Polikatianna ca. intermedia</i>			
Altitud	3	1.87	n.s.
Biotopo	1	2.25	n.s.
fecha de colecta	3	2.62	**
Altitud*Biotopo	3	1.87	n.s.
Altitud*fecha de colecta	9	1.50	n.s.
Biotopo*fecha de colecta	3	1.87	n.s.
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	2.5	**
<i>Ptenothrix ca. californica</i>			
Altitud	3	1.06	n.s.
Biotopo	1	3.60	n.s.
fecha de colecta	3	2.64	**
Altitud*Biotopo	3	0.54	n.s.
Altitud*fecha de colecta	9	2.41	**
Biotopo*fecha de colecta	3	1.20	n.s.
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	1.33	n.s.

7.3.1 Discusión

El efecto de la temperatura es importante en el establecimiento de los diferentes organismos a través de un gradiente altitudinal, de tal forma que en ambientes como los bosques de montaña, el sitio donde se extraigan dichas muestras es de gran importancia y tal como lo muestran los resultados del presente trabajo se aprecia un efecto para la altitud.

Viendo esta variable, el biotopo, particularmente la hojarasca, observamos que es importante en la asociación de organismos, dando como resultado, en cada tipo de vegetación, estructuras particulares (Gómez-Anaya & Palacios-Vargas 2004), de igual forma la menciona Schowalter (2006) al contemplar a un biotopo como esencial en la distribución de organismos, principalmente de insectos.

Por otro lado los hexápodos también son sensibles a los cambios estacionales, y tal como se apreció a lo largo del estudio encontramos una mayor abundancia de organismos en la época de lluvias en comparación a la de secas.

En el caso de la humedad, como ya lo ha mencionado Rusek (1998), es un factor importante en la distribución y abundancia de los colémbolos, sobre todo en un hábitat como los bosques templados, donde las condiciones atmosféricas presentan una constante humedad ya sea por las lluvias, la neblina y/o las bajas temperaturas.

De tal forma, al tomar las muestras se observó que el porcentaje de humedad varía dependiendo del tiempo y espacio, encontrando una mayor humedad en la época de lluvias, y de igual forma a mayor altitud (3,657 m), donde la neblina fue más densa, principalmente en secas, ocasionando una mayor humedad en este piso.

Scholwalter (2006), señala al CO₂ como un factor abiótico importante en la asociación de los artrópodos, pero no hace mención de algún efecto relacionándolo con las diferentes épocas en que se pueden coleccionar, siendo éste un dato relevante ya que se sabe que la disminución de CO₂ atmosférico tiende a variar a lo largo del año, lo cual puede deberse a la precipitación o aumentar dicho gas por los diferentes procesos de descomposición, y al no ser continua modifican la variable a lo largo de las colectas.

De acuerdo con Scholwalter (2006), la concentración de CO₂ disminuye conforme aumenta la altitud, por consiguiente el ensamblaje de colémbolos tiende a variar en los diferentes estratos, y podemos inferir que el biotopo es importante en la acumulación de dicha variable ya que no encontramos efectos significativos a lo largo del muestreo, por ende la densidad de microartrópodos edáficos es mayor en comparación a los epiedáficos quienes tienen que adaptarse a las bajas concentraciones de CO₂.

Los bosques templados presentan suelos ácidos (Porta *et al.* 1999), lo cual concuerda con lo encontrado en el presente estudio, pero a lo largo de las diferentes épocas de colecta esta acidez presentó efectos significativos, posiblemente provocado por la humedad que se encuentra en el ecosistema, además del proceso de mineralización (Prause *et al.* 2003) efectuado por la baja tasa de descomposición de la hojarasca en dichos bosques.

A lo largo del año de colecta, las diferentes variables presentan efectos, de igual forma el Carbono presenta esta característica, debido principalmente a los cambios de precipitación, ya que esta tienden a cambiar en muy poco tiempo e inclusive en un solo día, tal y como se pudo constatar en prácticamente cada colecta donde podía caer una lluvia muy fuerte y a los cinco minutos se despejaba totalmente. Por ende el agua lava

los diferentes nutrientes edáficos constantemente, y a pesar de tener fuertes capas de hojarasca, estos elementos se modifican considerablemente.

Muchos hexápodos son sensibles a los cambios de la interacción temperatura-humedad, y los colémbolos no son la excepción, de tal forma que el ensamblaje encontrado en cada punto de colecta es diferente ya que en una misma zona de las condiciones ambientales están cambiando continuamente, ya sea por la radiación solar directa (en el piso IV), o la sombra que encontramos en otros sitios (Pisos I y-III), e inclusive el biotopo aunado a las anteriores variables confieren características edáficas propias en cada punto de estudio.

Coleman, *et al.* (2006) mencionan a este ecosistema de gran importancia para los diferentes organismos, sobre todo en su interacción con los diferentes componentes abióticos, de esta forma, las raíces pueden arrestar diferentes elementos y compuestos como pueden ser hidrogeno, CO₂, sales, entre otros elementos. Por consiguiente, una zona puede contener elementos esenciales similares para el establecimiento de los diferentes organismos.

Por ejemplo, *Friesea hoffmannorum* la podemos encontrar en los cuatro puntos de muestreo, presentando una amplia distribución, pero las condiciones ambientales se modifican a lo largo del año de colecta pueden determinar la estructura de la población, y en particular para este bosque, encontramos mayor abundancia de juveniles en la época de lluvias y en secas a los adultos.

En cambio la familia Odontellidae, para su establecimiento debe encontrar condiciones particulares, principalmente en el tipo de bosque y la alteración que presente dicho ecosistema, de tal forma que los bosque de encino, presentes en los pisos I y II, son lugares ideales para el establecimiento de esta familia, tal como ocurre en el trabajo de Bondarenko-Borisova y Sandul (2002), pero la alteración constante que se encuentra en el piso I, puede ser el causante de la nula abundancia de organismos.

De tal forma, encontramos en cada especie variables particulares para su establecimiento, ya sean bióticas, como en los odontélidos, o abióticas como en la mayoría de las especies en estudio.

7.4 Variables bióticas y abióticas del suelo sobre las poblaciones de colémbolos

Para las diferentes correlaciones múltiples, se emplearon las siguientes variables, bióticas y abióticas: altitud, temperatura, humedad, CO₂, pH en agua y KCl, carbono e inclinación de la ladera.

En el caso de la densidad total de colémbolos se encontró correlaciones significativas positivas para la humedad y negativas para el CO₂ ($r_{320} = 0.286$; $r_{320} = -0.19$, $p < 0.05$) (Fig. 15).

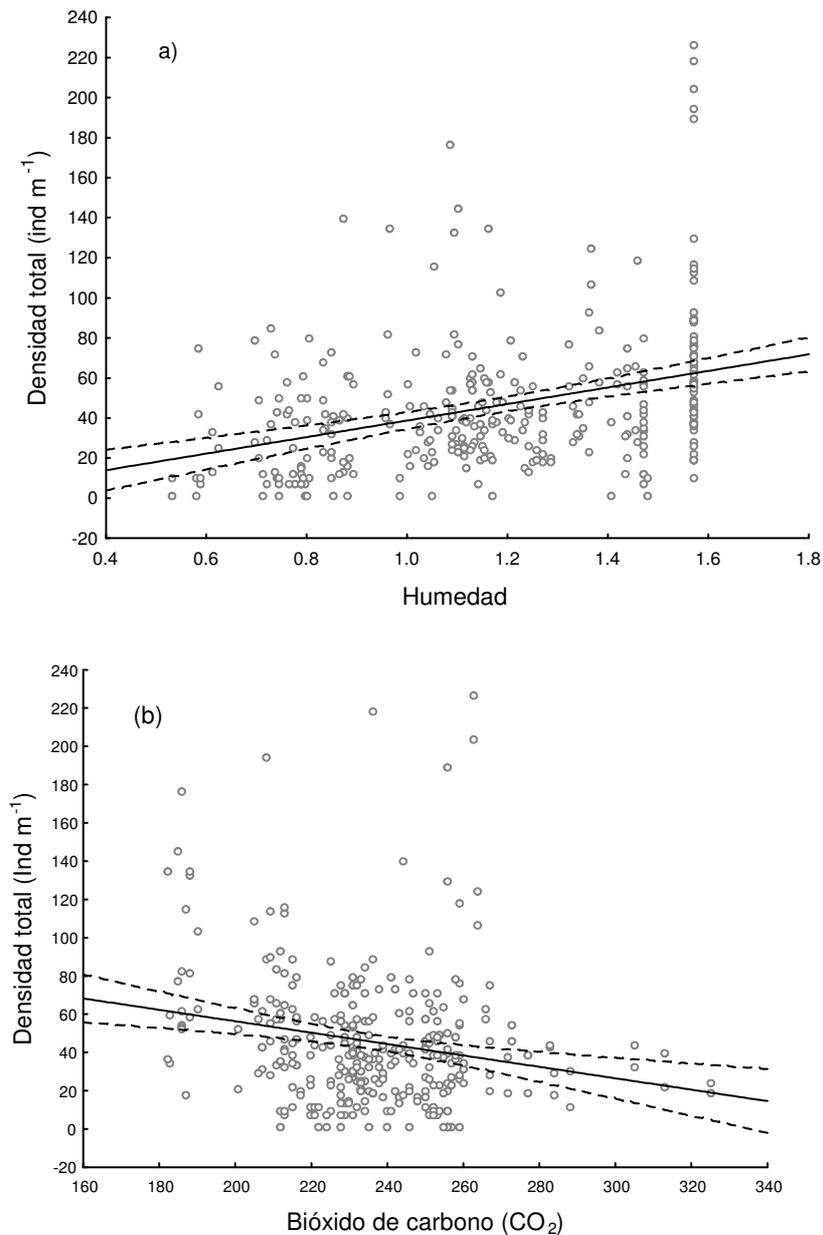


Figura 15. Correlación lineal entre a) humedad y la densidad total de Collembola, y b) CO₂ y total de colémbolos.

Por la gran cantidad de datos que podemos obtener, sólo se mencionan aquellos que presentan correlaciones significativas, en el siguiente cuadro.

Cuadro 10.- Correlaciones de las densidades poblacionales de las especies de colémbolos del Volcán Iztaccíhuatl, (r_{320} , * = $p < 0.05$, ** $p < 0.005$, *** $p < 0.0005$).

Especie	Factor	Correlación	p
<i>Hypogastrura ca. hispanica</i>	Humedad	0.146	*
	pH agua	-0.19	*
	pH KCl	0.182	*
<i>Ceratophysella ca. brevis</i>	Humedad	0.215	**
	CO ₂	0.223	**
	Inclinación	0.351	**
<i>C. ca. denticulata</i>	Temperatura	-0.17	***
	Inclinación	0.199	***
<i>C. ca. succinea</i>	Altitud	-0.24	*
	Humedad	0.163	*
	Inclinación	0.213	*
<i>Schoettella ca. glasgowi</i>	Altitud	0.280	***
	Humedad	0.144	***
<i>Superodontella ca. conglobata</i>	Inclinación	0.220	**
<i>S. ca. nana</i>	Inclinación	0.177	*
<i>Friesea hoffmannorum</i>	Altitud	0.389	***
	Humedad	0.108	***
	CO ₂	-0.25	***
	Inclinación	-0.13	***
<i>Neanura muscorum</i>	CO ₂	0.235	***
<i>Americanura ca. prima</i>	Inclinación	0.183	*
<i>A. ca. izabalana</i>	Temperatura	-0.18	**
	pH KCl	0.194	**
<i>Pseudachorutes ca. romeroi</i>	Época de colecta	-0.26	***
	Temperatura	0.208	***
<i>P. ca. simplex</i>	Época de colecta	0.152	***
	CO ₂	-0.22	***
	pH KCl	0.188	***
<i>Protaphorura macrodentata</i>	Altitud	0.286	***
	CO ₂	0.359	***
	pH agua	0.225	***
<i>P. meridiata</i>	Temperatura	0.177	*
<i>Mesaphorura florae</i>	CO ₂	-0.21	**
<i>Mesaphorura macrochaeta</i>	Altitud	-0.42	***
	pH KCl	-0.17	***
	Inclinación	-0.21	***
<i>Metaphorura affinis</i>	Altitud	-0.21	***
	Inclinación	-0.37	***
<i>Proisotoma ca. alticola</i>	Altitud	0.285	***
	Humedad	0.125	***
<i>P. frisoni</i>	Temperatura	0.151	*
<i>P. ca. sepulcralis</i> ¹	Altitud	-0.28	**
	CO ₂	-0.28	**
<i>P. ca. sepulcralis</i> ²	Carbono	0.155	*
<i>Proisotoma sp. 1</i>	Carbono	0.180	*
<i>Proisotoma sp. 3</i>	pH agua	0.205	*
	Inclinación	0.150	*
<i>Proisotoma sp. 4</i>	pH agua	0.212	*
<i>Folsomina onychiurina</i>	pH agua	-0.19	*

Continuación cuadro 10.

Especie	Factor	Correlación	p
<i>Clavisotoma ca. plicicauda</i>	Altitud	-0.29	*
	Inclinación	0.179	*
<i>Isotomurus ca. palustroides</i>	Altitud	0.281	***
	Temperatura	0.206	***
	pH KCl	0.224	***
<i>I. ca. tricolor</i>	Altitud	0.316	***
<i>Isotoma ca. subviridis</i>	Temperatura	0.252	**
	pH agua	0.226	**
	pH KCl	-0.30	**
	Inclinación	-0.32	**
<i>Parisotoma ca. notabilis</i>	Altitud	-0.53	*
	Humedad	0.169	*
	Inclinación	0.290	*
<i>Parisotoma ca. tariva</i>	Época de colecta	-0.20	*
	Carbono	0.169	*
<i>Desoria ca. flora</i>	Altitud	0.489	***
	CO ₂	-0.19	***
<i>Orchesella ca. folsomi</i>	Humedad	-0.14	*
<i>Americabrya arida</i>	Humedad	-0.26	*
	pH KCl	0.218	*
	Carbono	-0.12	*
<i>Entomobrya ca triangularis</i>	Altitud	-0.27	***
	Humedad	0.156	***
	CO ₂	-0.28	***
<i>Entomobrya sp. 1</i>	Carbono	0.171	*
<i>Entomobrya sp. 2</i>	Carbono	0.183	***
<i>Entomobrya sp. 3</i>	pH KCl	0.173	*
<i>Willowsia mexicana</i>	Humedad	-0.16	***
	Inclinación	0.287	***
<i>Pseudosinella ca. hirsuta</i>	Carbono	0.206	**
<i>Sminthurides ca. occultus</i>	Biotopo	-0.17	***
	Humedad	-0.13	***
	CO ₂	-0.47	***
	pH KCl	-0.23	***
<i>Sminthurides sp. 1</i>	Altitud	0.337	***
	Temperatura	0.154	***
	Humedad	0.311	***
	pH KCl	0.216	***
<i>Sphaeridia pumilis</i>	Humedad	0.149	***
	CO ₂	-0.23	***
<i>Sminthurinus ca. elegans</i>	pH KCl	-0.21	**
	Inclinación	-0.22	**
<i>Sminthurinus ca. quadrimaculatus</i>	Humedad	0.185	*
	pH agua	-0.21	***
	Carbono	-0.24	***
<i>Ptenothrix ca. californica</i>	Humedad	0.124	**
	pH agua	-0.19	**
	pH KCl	0.260	**
<i>Sminthurus ca. eisenii</i>	Humedad	0.232	***
	pH KCl	-0.19	***
<i>Sminthurus ca. incisus</i>	Altitud	-0.27	***
	Temperatura	-0.17	***
	Humedad	0.225	***
	Carbono	-0.22	***
	Inclinación	0.264	***

Continuación cuadro 10.

Especie	Factor	Correlación	p
<i>Sminthurus ca. fitchi</i>	Altitud	0.256	**
	Humedad	-0.15	**
	CO ₂	0.224	**
<i>Neelus murinus</i>	Altitud	-0.51	***
	CO ₂	-0.23	***
	Inclinación	0.318	***
<i>Neelides minutus</i>	Inclinación	0.185	**
<i>Megalothorax incertus</i>	Altitud	-0.29	**
	pH KCl	0.175	**
<i>Megalothorax minimus</i>	Altitud	-0.26	**
	Inclinación	0.173	**

7.4.1 Discusión

De manera general, los organismos epiedáficos son más abundantes conforme aumenta la altitud (Prinzing & Woas 2003), y en el Iztaccíhuatl se encontró el mismo patrón, principalmente para *Desoria ca. flora* de la familia Isotomidae, quien se presenta exclusivamente en el piso IV.

Con esto, vemos la importancia del suelo y la hojarasca como un aislante de temperatura (Schowalter 2006), y contrasta con lo encontrado por Cutz-Pool (2008), donde los organismos corticícolas disminuyen en abundancia y diversidad conforme se incrementa el gradiente altitudinal, e inclusive en este trabajo las formas epiedáficas presentaron una mayor representatividad en las zonas más altas.

Por otro lado el CO₂ aumenta conforme se incrementa la temperatura sobre todo en regiones de altas latitudes principalmente en pastizales y tundra, sin embargo en los bosques templados, por la altitud, presentan condiciones similares (Niinistö *et al.* 2004) aunado con esto se encontró que el alto porcentaje de este gas aumenta la abundancia y diversidad de los organismos (Coûteaux & Bolger 2000). Para el Iztaccíhuatl los resultados fueron diferentes, ya que el aumento de CO₂ se relaciona con la disminución de la abundancia de los colémbolos.

Particularmente *Schoettella ca. glasgowi*, *Friesea hoffmannorum*, *Protaphorura macrodentata*, *Proisotoma ca. alticola*, *Isotomurus ca. palustroides*, *I. ca. tricolor*, *Desoria ca. flora*, *Sminthurides sp. 1*, *Sminthurus ca. fitchi* y *Neelides minutus*, presentan una mayor abundancia conforme se aumenta la altitud, aunque no todas estas especies las podemos localizar en los cuatro pisos altitudinales, excepto a *Friesea hoffmannorum*.

A la mayoría de ellas las podemos encontrar con una mayor abundancia en el piso III, esto podría deberse por una alta humedad, ya que presentan afinidades por este factor, excepto *Sminthurides* sp. 1, quien presenta una mayor abundancia conforme disminuye dicho factor. Sin embargo el CO₂, es quien realmente está determinando la abundancia, ya que no existe un comportamiento positivo para todas las especies, sino que algunas prefieren las altas concentraciones de dicho gas (*Protaphorura macrodentata*) y otras se comportan inversamente (*Friesea hoffmannorum*, *Desoria* ca. *flora* y *Sminthurus* ca. *fitchi*).

En el caso de *Ceratophysella* ca. *succinea*, *Mesaphorura macrochaeta*, *Metaphorura affinis*, *P. ca. sepulcralis*¹, *Clavisotoma* ca. *plicicauda*, *Parisotoma* ca. *notabilis*, *Entomobrya* ca. *triangularis*, *Sminthurus* ca. *incisus*, *Neelus murinus* y *Megalothorax minimus*, encontramos una mayor abundancia a menor altitud, en particular a *Ceratophysella* ca. *succinea*, sólo se encontró en el piso II.

En general estas especies están siendo afectadas positivamente por la ladera en que se encuentran, los puntos intermedios muestran una mayor y abundancia, esto viéndolo desde el punto de vista topográfico encontrándose las condiciones adversas que se dan en los diferentes volcanes, tienden a mejorar en algunos sitios donde la temperatura aumenta, la retención de humedad es mejor, y el porcentaje de CO₂ es el ideal para un mejor establecimiento de las poblaciones, tal como describe Cepeda (2006) para los Andes, donde la heterogeneidad de la topografía ocasiona condiciones ambientales más favorables.

De las especies antes mencionadas, existen otras, como *Superodontella* ca. *conglobata*, *S. ca. nana*, *Americanura* ca. *prima*, *Proisotoma* sp. 3 y *Sminthurus* ca. *eisenii*, que se comportan de la misma manera.

Como ya lo ha mencionado Rusek (1998), la humedad es un factor importante para la estructura de comunidades edáficas, y en este caso es un factor determinante para las especies: *Hypogastrura* ca. *hispanica*, *Ceratophysella* ca. *brevis*, *Orchesella* ca. *folsomi*, *Americabrya arida*, *Willowsia mexicana*, *Sminthurides* ca. *occultus*, *Sphaeridia pumilis*, *Sminthurinus* ca. *quadrifasciatus*, *Ptenothrix* ca. *californica*, y *Sminthurus* ca. *eisenii*. Se puede observar que los Symphypleona y Poduromorpha, presentan mayor abundancia conforme aumenta la humedad, de tal forma que en la época de lluvia se encontraron con mayor frecuencia, y en lo referente al biotopo se colectaron en ambos sitios con la misma frecuencia.

Las especies restantes mostraron una preferencia por ambientes más secos, e inclusive fueron más abundantes en la hojarasca, en la época de secas.

En el caso de *Ceratophysella* ca. *denticulata*, *Americanura* ca. *izabalana*, *Pseudachorutes* ca. *romeroi*, *Protaphorura meridiana*, *Proisotoma frisoni* e *Isotoma* ca. *subviridis*, muestran preferencias por las altas temperaturas (excepto *C.* ca. *denticulata* y *A.* ca. *izabalana*), pero su mayor abundancia se encuentra, generalmente, en el piso III (excepto *Protaphorura meridiana* e *Isotoma* ca. *subviridis*), donde las pendientes y humedad son importantes para el establecimiento de una gran diversidad de especies. Por consiguiente vemos que este piso es importante a lo largo de las épocas de colecta, ya que presentan diferentes microclimas donde la distribución de las especies es heterogénea, como resultado de la topografía del sitio en estudio.

El porcentaje de Carbono, está relacionado con el contenido de materia orgánica en el medio, en este caso tanto en la hojarasca como en el suelo, Bandyopadhyaya *et al.* (2002, tomado de Guillen *et al.* 2006) encuentran que los contenidos de materia orgánica elevados son generalmente benéficos para los colémbolos. Aunque en el Iztaccíhuatl no se encontraron correlaciones significativas entre los diferentes pisos altitudinales, sí se encontraron especies (*Proisotoma* ca. *sepulcralis*², *Proisotoma* sp. 1, *Parisotoma* ca. *tariva*, *Entomobrya* sp. 1, *E.* sp. 2 y *Pseudosinella* ca. *hirsuta*), que aumentan su abundancia proporcionalmente con el porcentaje de carbono.

De igual forma, se observó que en todas las especies antes mencionadas encuentran una preferencia por las épocas secas, por lo que podemos inferir que la constante lluvia arrastra con ella un gran cantidad de nutrimentos a las partes más bajas del volcán, desafortunadamente no se llevo a cabo dicha investigación quedando como probable hipótesis.

El pH (real y potencial) fue diferente en cada piso altitudinal mostrando un efecto positivo sobre *Pseudachorutes* ca. *simplex*, *Proisotoma* sp. 4, *Entomobrya* sp. 3 y *Megalothorax incertus* y negativo para *Folsomina onychiurina*, pudiendo decir que este factor ejerce una barrera selectiva para algunas de las especies de colémbolos del Iztaccíhuatl.

Como ya se mencionó, los diferentes organismos edáficos muestran preferencias por algún tipo de biotopo (cuadro 1) y en este caso encontramos que *Willowsia* ca. *nicromaculata* prefiere la hojarasca y *Seira purpurea* el suelo, en ambos casos es el biotopo el único factor que afecta la distribución de estas especies.

Finalmente, encontramos que la altitud es un factor que determina la distribución de las diferentes especies, de igual forma la humedad y porcentaje de CO₂, sin embargo se encontró que la heterogeneidad topográfica afecta la distribución de los diferentes organismos, al modificar de manera positiva las condiciones atmosféricas además de factores físicos y químicos, logrando un particular asociación de colémbolos, principalmente en el piso III.

7.5 Variables físicas, químicas y biológicas del suelo sobre el ensamblaje de la colembofauna del Iztaccíhuatl

El análisis Correspondencia Canonica (CCA) muestra que los ejes canónicos 1 y 2 explican el 59.4 % de la composición de la varianza, el CO₂ el que mejor explica el eje 1 ($r = 0.70$) junto con la altitud ($r = 0.69$), mientras que la pendiente está mejor relacionada con el eje 2 ($r = -0.77$) (Fig. 3), la prueba de Monte-Carlo muestra diferencias significativas de $p = 0.005$ con 199 permutaciones (Fig. 16).

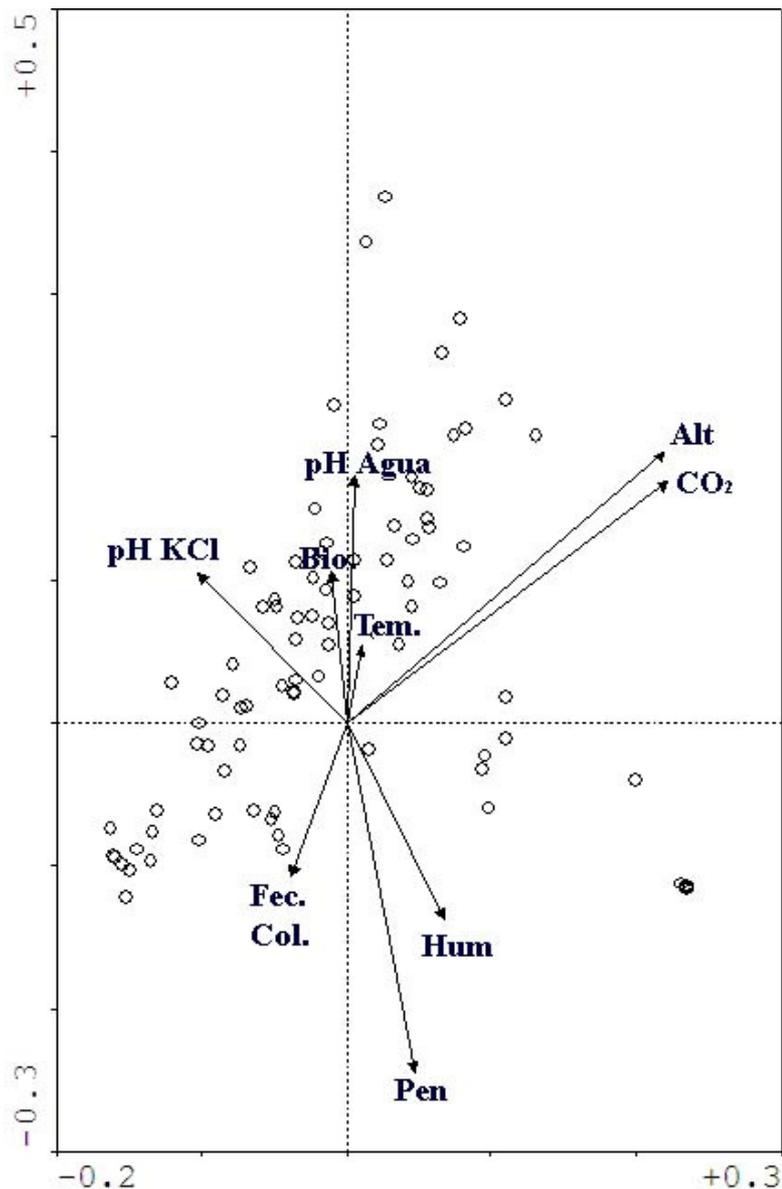


Figura 16. Análisis de Correspondencia Canónico (CCA) de las diferentes especies de Collembola de la ladera noroeste del Volcán Iztaccíhuatl, México. Los círculos corresponden a las especies. (*Alt*= altitud; *pH* = Potencial hidrogeno; *pH KCl* = Potencial hidrogeno, tratado con cloruro de potasio; *Bio* = biotopo; *Tem* = Temperatura; *Fco* = fecha de colecta; *Hum* = Humedad y *Pen* = Pendiente).

Las especies más relacionadas con el eje 1 son: *Americanura ca. prima*, *Proisotoma ca. plicicauda*, *Seira purpurea*, *Sminthurus ca. incisus*, *Neelus murinus* y *Megalothorax incertus* (Fig. 17).

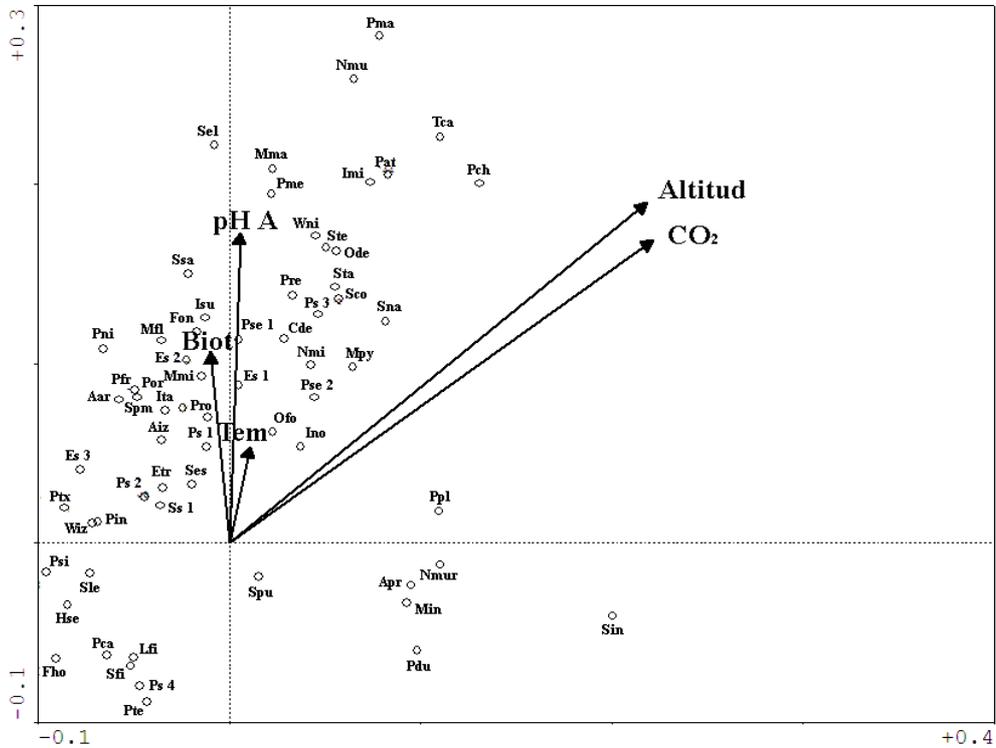


Figura 17. Análisis de Correspondencia Canónico (CCA) de las diferentes especies de Collembola de la ladera noroeste del Volcán Iztaccíhuatl. México. Hse = *Hypogastrura ca. sensilis*, Cde = *Ceratophysella ca. denticulata*, Wiz = *Willemia ca. bedosae*, Ste = *Stenogastrura*, Ode = *Odontella ca. denticulata*, Sco = *Superodontella ca. conglobata*, Sna = *S. ca. nana*, Sta = *Stachiomella sp.* Fho = *Friesea Hoffmannorum*, Nmu = *Neanura muscorum*, Apr = *Americanura ca. prima*, Aiz = *A ca. izabalana*, Pro = *Pseudachorutes ca. romeroi*, Psi = *P. ca. simplex*, Mpy = *Micranurida pygmaea*, Pma = *Protaphorura macrodentata*, Pme = *P. meridiana*, Mfl = *Mesaphorura floriae*, Mma = *M. macrochaeta*, Fon = *Folsomia onychiurina*, Pch = *Proisotoma chichinautzini*, Pfr = *Proisotoma frisoni*, Ppl = *P. ca. plicicauda*, Pse1 = *P. ca. sepulcralis*¹, Pse2 = *P. ca. sepulcralis*², Ps1 = *P. sp 1*, Ps2 = *P. sp 2*, Ps3, *P. sp 3*, Ps4 = *P. sp 4*, Imi = *Isotomiella minor*, Isu = *Isotoma ca. subviridis*, Ino = *I. ca. notabilis*, Ita = *I. ca. tariva*, Ofo = *Orchesella ca. folsomi*, Aar = *Americabrya arida*, Etr = *Entomobrya ca. triangularis*, Es1 = *E. sp1*, Es2 = *E. sp2*, Es3 = *E. sp3*, Wni = *Willowsia ca. nicromaculata*, Lfi = *Lepidocyrtus finus*, Pdu = *Pseudosinella ca. dubia*, Pni = *P. ca. sexoculata*, Por = *P. ca. orba*, Pte = *P. ca. testa*, Tca = *Plutomurus ca. californicus*, Sle = *Sminthurides ca. lepus*, Ss1 = *Sminthurides sp 1*, Spm = *Sphaeridia pumilis*, Pin = *Polikatiana ca. intermedia*, Sel = *Sminthurinus ca. elegans*, Spu = *S. ca. quadrimaculatus*, Pat = *Ptenothrix ca. atra*, Pca = *P. ca. californica*, Pre = *P. ca. renateae*, Ptx = *P. ca. texensis*, Ses = *Sminthurus ca. eisenii*, Sin = *S. ca. incisus*, Sfi = *S. ca. fitchi*, Ssa = *S. ca. sagittus*, Nmur = *Neelus murinus*, Nmi = *Neelides minutus*, Mmi = *Megalothorax minimus*, Min = *M. incertus*. (pH = Potencial hidrogeno; Biot = biotopo; Tem = Temperatura).

Las especies más relacionadas con el eje 2 son: *Pseudachorutes ca. romeroi*, *Proisotoma sp1*, *Proisotoma sp 4*, *Orchesella ca. folsomi*, *Pseudosinella ca. testa*, *Sminthurus ca. eisenii* y *Megalothorax minimus* (Fig. 18).

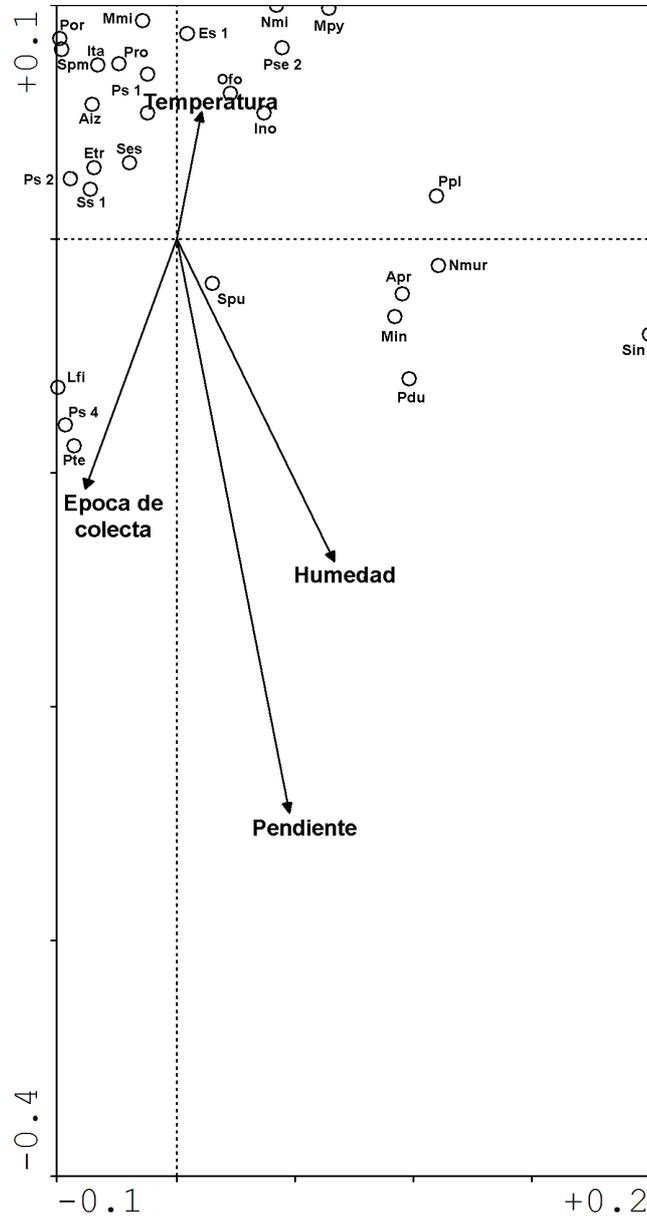


Figura 18. Análisis de Correspondencia Canónica (CCA) de las diferentes especies de Collembola de la ladera noroeste del Volcán Iztaccíhuatl. México. Apr = *Americanura ca. prima*, Aiz = *A. ca. izabalana*, Pro = *Pseudachorutes ca. romeroi*, Mpy = *Micranurida pygmaea*, Ppl = *Proisotoma ca. plicicauda*, Pse2 = *P. ca. sepulcralis*², Ps1 = *P. sp 1*, Ps2 = *P. sp 2*, Ps4 = *P. sp 4*, Ino = *Isotoma ca. notabilis*, Ita = *I. Ca. tariva*, Ofo = *Orchesella ca. folsomi*, Etr = *Entomobrya ca. triangularis*, Es1 = *E. sp 1*, Spu = *Seira purpurea*, Lfi = *Lepidocyrtus finus*, Pdu = *Pseudosinella ca. dubia*, Por = *P. ca. orba*, Pte = *P. ca. testa*, Ss1 = *Sminthurides sp 1*, Spm = *Sphaeridia pumilis*, Ses = *Sminthurus ca. eisenii*, Sin = *S. ca. incisus*, Nmur = *Neelus murinus*, Nmi = *Neelides minutus*, Mmi = *Megalothorax minimus*, Min = *M. incertus*.

7.5.1 Discusión

La asociación de la fauna de colémbolos está dado por el conjunto de diferentes variables físicas, químicas y biológicas y en general sólo alguna o algunas de ellas son de mayor importancia, dadas las condiciones atmosféricas de los bosques de grandes altitudes.

En el caso de los organismos de volcanes se ha contemplado que la altitud junto con la humedad son los principales factores para su distribución (Butticaz 1996, Sadaka & Ponge 2003, Coleman *et al.* 2006, Frouz *et al.* 2004, Schowalter 2006); sin embargo, en sus diferentes resultados no consideran variables como el porcentaje de CO₂ y la pendiente de las diferentes laderas, siendo esta última de suma importancia en trabajos de microartrópodos en los Andes (Cepeda 2006).

Como se puede observar, el factor que más influye en los colémbolos es el CO₂, el que se encuentra relacionado directa e indirectamente con la altitud, de tal forma que la unión de ambas variables están dando la asociación en los diferentes pisos altitudinales, principalmente en las especies *Americanura ca. prima*, *Proisotoma ca. plicicauda*, *Seira purpurea*, *Sminthurus ca. incisus*, *Neelus murinus* y *Megalothorax incertus*.

Al observar con más detalle las especies mencionadas, se nota que se encuentran distribuidas preferencialmente en los pisos intermedios donde las condiciones atmosféricas son en promedio constantes, principalmente en lo referente a la humedad, porcentaje de carbono, temperatura y pH con agua y KCl.

Aunque en las diferentes épocas de colecta dichas variables pueden modificarse un poco, existe una gran diversidad de organismos, a pesar de tener una topografía bastante accidentada, o con inclinaciones muy pronunciadas como es el caso del piso II.

El tipo de vegetación está dada también por diferentes variables que se dan conforme aumenta la altitud, de tal forma que la hojarasca que encontremos en cada sitio de colecta es diferente, excepto en los pisos I y II, de tal forma esperaríamos condiciones particulares en cada zona para el establecimiento de los diferentes organismos; sin embargo, este factor no es influyente en la estructura de los organismos.

Por otro lado Bandyopadhyaya *et al.* (2002, tomado de Guillen *et al.* 2006) mencionan que el aumento de carbono en los suelos está relacionado directamente con la abundancia de colémbolos edáficos, pero en el Iztaccíhuatl no ocurre ésto, e inclusive en el análisis CCA no aparece como probable variable que afecte a los diferentes organismos.

Con lo referente a la temperatura, Guillen *et al.* (2006) encontraron que las bajas temperaturas afectan positivamente las poblaciones de colémbolos, pero estos resultados surgen de ambientes cálidos, caso contrario ocurre en el Iztaccíhuatl, donde la temperatura baja considerablemente conforme se incrementa la altitud, de tal forma que los organismos deben buscar formas de escape ante esta inclemencia ya sea por diapausa o buscando lugares más cálidos, por ejemplo, migrando verticalmente en el suelo, pero ya se ha mencionado que el hábitat no es factor determinante en la distribución de los diferentes organismos.

De igual forma el pH ha demostrado ser una limitante para el establecimiento de ciertas especies (Hågvar 1987, Van Straalen 1997), en este caso, sólo algunas se encuentran restringidas por dicha variable (ver capítulo anterior), pero en general es un factor de poca importancia para la distribución de los organismos.

Como se puede observar, algunos de los diferentes factores que encontramos a lo largo de los diferentes pisos altitudinales pueden variar, ya sea por la altitud (Hasegawa *et al.* 2006) o por las diferentes épocas de colecta (Prieto *et al.* 1999); ya que no es lo mismo tomar muestras en secas que en lluvias, sobre todo que el final de esta época se encuentra ligada con los temporales más fríos, entonces debe existir una variable, además de la unión del CO₂ interaccionando con la altitud, que ayude al establecimiento de los diferentes organismos.

Como ya se ha mencionado la humedad es un elemento indispensable en la estructura del ensamblaje de los colémbolos, pero en el análisis del CCA no fue significativo tanto en el eje 1 como en el eje 2, por lo que podemos inferir que a pesar de una gran humedad que se encuentra en el volcán, existen procesos para evitar estancamientos tanto en el suelo como en la hojarasca y de igual forma arrastrar de este medio nutrientes (carbono) y hacer más ácido el medio en que se distribuyen los organismos.

La pendiente es un factor de suma importancia en los ecosistemas de montaña, como ya lo ha mencionado Cepeda (2006), principalmente cuando es muy accidentado o presenta grados de inclinación pronunciadas, de tal forma establece, en sitios relativamente cercanos, microhabitats particulares para los diferentes asociaciones de colémbolos, de tal forma que este factor, junto a la altitud y CO₂, tiende a ser los principales mecanismos que dan la estructura de las comunidades de colémbolos.

8 Conclusiones

- Se colectaron 77,113 organismos, siendo colémbolos el 31.22 %.
- La mayor abundancia se encontró en el piso IV (3,687 m).
- Los Isotomidae fueron los más abundantes en el estudio.
- Las especies de mayor densidad son: *Ceratophysella ca. brevis* y *Desoria ca. flora*.
- La estructura de las diferentes especies son particulares para cada sitio, e inclusive presentan ciertas especies exclusivas en cada piso.
- Las especies *Protaphorura macrodentata*, *P. meridiata*, *Proisotoma ca. obtusicauda*, *Folsomides. chichinautzini* y *Plutomurus ca. californicus* se encontraron únicamente en el piso I (2,753 m).
- En el piso II (3 015m) se encontraron exclusivamente las siguientes especies, *Ceratophysella ca. succinea*, *Odontella ca. denticulata*, *Superodontella ca. conglobata*, *S. ca. nana*, *Stachiosmella sp.*, *Micranurida pygmaea*, *Mesaphorura krausbaueri*, *Fissuraphorura sp.* y *Dicyrtoma ca. mithra*.
- La exclusividad por el piso III (3,250) la presentan: *Hypogastrura ca. hispanica*, *Proisotoma frisoni*, *Pseudosinella ca. hirsuta*, *P. ca. orba* y *Ptenothrix ca. texensis*.
- Las siguientes especies, presentaron una exclusividad por el piso IV: *Schoettella ca. glasgowi*, *Proisotoma minuta*, *P. sp 4*, *Isotomurus ca. palustroides*, *Desoria ca. flora*, *Granisotoma communa*, *Pseudosinella ca. testa*, *Sminthurinus Sp*, *Sminthurus ca. fitchi*.
- De manera general, no se encontraron diferencias entre los biotopos, encontrando similitudes en la estructura tanto en el suelo como en la hojarasca, por lo que pensaríamos en migraciones verticales, debidas principalmente a la humedad.
- En la época de lluvias se encontró la mayor diversidad de colémbolos, sobrepasando a los oribátidos.
- El piso II mostró la mayor diversidad de colémbolos.
- En los pisos I-III y I-IV se encontraron diferencias significativas, para la diversidad.
- Diferentes factores son determinante para la estructura de colémbolos, siendo principalmente la altitud, el CO₂ y la inclinación de las diferentes pendientes.

- La altitud presentó correlaciones significativas para la temperatura, humedad y CO₂.
- La interacción entre la altitud y época de colecta presentó correlaciones significativas para la densidad de colémbolos.
- La densidad de colémbolos presentó correlaciones significativas positivas para la humedad y negativas para el CO₂.
- Por primera vez, se emplea al CO₂, como factor para el establecimiento de los colémbolos, siendo un elemento, junto con la altitud, responsables de la abundancia y diversidad de colémbolos en bosques templados, similares al del Iztaccíhuatl.
- El porcentaje de carbono y pH (en agua y KCl), sólo son barreras selectivas para algunas especies.
- La heterogeneidad topográfica forma microhábitats donde diferentes especies pueden colonizar, aun en condiciones atmosféricas extremas.
- La combinación de altitud, CO₂ y pendiente de la ladera, son los principales factores para la asociación de los colémbolos.
- De los cuatro pisos altitudinales, el primero presenta similitudes a lo largo del período de colecta.
- En época de secas los pisos intermedios presentaron densidades poblacionales similares.
- El piso IV presenta asociaciones similares tanto en secas como al inicio de las lluvias.
- En la época de lluvias los pisos intermedios, además del IV (el agosto) presentan similitudes.

9 Bibliografía

- Adejuyigbe, C. O., G. Tian & G. O. Adeoye.** 2006. Microcosmic study of soil microarthropod and earthworm interaction in litter decomposition and nutrient turnover. *Nutrient cycling in agroecosystems* 75:47-55.
- Andalkar, A.** 2005. www.skimountaineer.com/ROF/ROF.php?name=Izta última actualización abril 2005.
- Badejo, M. A., T. I. Nathaniel & G. Tian.** 1998 Abundance of springtails (Collembola) under four agroforestry tree species with contrasting litter quality. *Biol Fértil Soils* 27:15-20.
- Barrera, A.** 1968. Distribución cliserial de los Siphonaptera del volcán Popocatepetl, su interpretación biogeográfica. *Anales del Instituto de Biología, serie Zoología*, 1:35-100
- Blyth, F. G. H. & M. H. de Freitas.** 1997, Geología para ingenieros, México. Edit. CECSA 115 pp.
- Bondarenko-Borisova I. V., & N. G. Gandul.** 2002. The fauna of springtails (Collembola) from the forest ecosystems of South-Easth Ukraine. *Vestnik zoologii* 36:11-21.
- Butticaz, R. J.** 1996. Ecología y aspectos funcionales de la biodiversidad en el suelo. *Agricultura ecología y desarrollo rural*. II congreso de la sociedad española de agricultura ecológica. Pamplona-Iruña Sep.
- Cassangne, N., T. Gauquelin, M-C. Bal-Serin & C. Gers.** 2004. Endemic collembola, privileged bioindicators of forest management. *Pedobiologia* 50 :127-134
- Cassagnau, P.** 1961. Écologie du sol dans les Pyrénées centrales, les biocenoses des Collemboles. Hermann, France. 235 pp.
- Cepeda, P., J.** 2006. Distribución altitudinal de microartrópodos edáficos. Geología de los Andes desérticos. La alta montaña del Valle del Elqui. Cepeda. P., J. (ed). Ediciones Universidad de la Serena. La Serena. Chile. Pp. 123-147
- Chistiansen, K. A.** 1992. Las colas de resorte. *Mundos Subterráneos*. 9:1-10 Palacios-Vargas (trad).
- Christiansen K. A. & P. Bellinger.** 1998. The Collembola of North America North of the Rio Grande, a taxonomical analisis, Grinnell Collage, Grinnell Iowa. USA.
- Coineau, Y.** 1995. Le sol: un melieu de vie.
www.fnh.org/download/foret_dossier2.pdf 25-Nov-2003.

- Cole, L., M. A. Bradford, P.J. A. Shaw, & R. D. Bardgett.** 2005. 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., D. A. Crossley & P. Hendrix.** 2006. Fundamentals of soil ecology. Elsevier, U.S.A. Second edition. 386 pp.
- Coûteaux, M. M. & T. Bolger.** 2000. Interactions between atmospheric CO₂ enrichment and soil fauna. *Plant and Soil* 224:123-134.
- Cragg, R. G. & R. D. Bardgett.** 2001. How changes in soil fauna diversity and composition within a trophic group influence decomposition processes. *Soil Biology & Biochemistry*, 33:2073-2081
- Cutz-Pool, L. Q.** 2003. Colémbolos edáficos de dos agrosistemas de San Salvador, Hidalgo. *Tesis de maestría en Ciencias (sistemática)*. Facultad de Ciencias UNAM. pp 99.
- Cutz-Pool, L. Q.** 2008. Distribución altitudinal de la comunidad de colémbolos en musgos corticícolas de la parte noroeste del Iztaccíhuatl. *Tesis de doctor en ciencias*. Facultad de ciencias UNAM. pp 112
- Cutz-Pool, L. Q., J. G. Palacios-Vargas & G. Castaño-Meneses.** 2005. Diversidad y abundancia de colémbolos de musgos corticícolas en el Volcán Iztaccíhuatl (otoño 2003). *Entomología mexicana* 4:171-175.
- Cutz-Pool, L. Q., A. García-Gómez & A. Bernal-Rojas.** 2006. Variación estacional de los invertebrados asociados a musgos corticícolas en la parte NW del Volcán Iztaccíhuatl, Estado de México, México. *Entomología mexicana* 5:227-231.
- Cutz-Pool, L. Q., J. G. Palacios-Vargas & G. Castaño-Meneses.** 2008. Estructura de la comunidad de colémbolos (Hexapoda: Collembola) en musgos corticícolas en un gradiente altitudinal de un bosque templado subhúmedo. *Revista de Biología Tropical*. 56 (2):739-748.
- Deleporte, S. & P. Tillier.** 1999. Long-term effects of mineral amendments on soil fauna and humus in an acid beech forest floor. *Forest Ecology and Management*, 118:245-252
- Detsis, V.** 2000. Vertical distribution of collembola in deciduous forests under mediterranean climatic conditions. *Belgica Journal Zoology*, 130:55-59
- D'Haese, C.** 1998. *Willemia anophthalma*-group (Collembola: Hypogastruridae): Systematics, new species, distribution and habitats. *European Journal of Entomology* 95:581-592

- Doles, J. L., R. J. Zimmerman & J. C. Moore.** 2001. Soil microarthropod community structure and dynamics in organic and conventionally managed apple orchards in Western Colorado, USA. *Applied Soil Ecology*, 18:83-96.
- Dress, W. & R. E. J. Boerner.** 2004. Patterns of microarthropod abundance in oak-hickory forest ecosystems in relation to prescribed fire and landscape position. *Pedobiologia*, 48:1-8.
- Ducarme, X. H. M. André, G. Wauthy & P. Lebrun.** 2004. Are there real endogeic species in temperate forest mites?. *Pedobiologia* 48:139-147
- Fabian, M.** 1998. The effects of different methods of preservation on the ¹⁵N concentration in *Folsomia candida* (Collembola). *Applied Soil Ecology*, 9:101-104.
- Frouz, J., A. Ali, J. Frouzova & R. J. Lobinske.** 2004. Horizontal and vertical distribution of soil macroarthropods along a spatio-temporal moisture gradient in subtropical Central Florida. *Community and Ecosystem Ecology*, 33: 1282-1295
- García, E.** 2004. Modificaciones al sistema de clasificación de Köppen 5a edición, serie libros Núm. 6. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F. 90 pp.
- García-Gómez A.** 2005. Estudio preliminar de comunidades de colémbolos asociados a suelo y hojarasca, en un gradiente altitudinal del Iztaccíhuatl. *Entomología mexicana* 4: 157-162
- Guillen, C., F. Soto-Adames & M. Springer.** 2006. Variables físicas, químicas del suelo sobre las poblaciones de colémbolos en Costa Rica. *Agronomía costarricense*, 30:19-29.
- Giller, P. S.** 1984. *Community structure and the niche*. Chapman & Hall Ed. London. 60 pp.
- Gómez-Anaya, J. A. & J. G. Palacios-Vargas.** 2004. Structure and composition of litter and soil poduromorpha assemblages (Hexapoda: Entognatha: Collembola) from a tropical dry forest in western Mexico. *Folia entomologica mexicana* 43:215-225.
- Hågvar, S.** 1987. Why do collembolas and mites react to changes in soil acidity?. *Entomologiske Meddelelser* 55: 115-119.
- Hasegawa, M., M. T. Ito, & K. Kitayama.** 2006. Community structure of oribatid mites in relation to elevation and geology on the slope of Mount Kinabalu, Malaysia. *European journal of soil biology* 42:S191-S196.

- Heaney, L.** 2001. Small mammal diversity along elevational gradients in the Philippines: an assessment of patterns and hypotheses. *Global Ecology & Biogeography* 10:15-39.
- Heneghan, L., D. C. Coleman, X. Zou, D. A. Crosseley Jr. & B. L. Haines.** 1998. Soil microarthropod community and litter decomposition dynamics: A study of tropical and temperate sites. *Applied Soil Ecology*, 9:33-38.
- Hopkin, S. P.** 2002. Collembola. *Encyclopedia of Soil Science*. Marcel Dekker (Ed.) United Kingdom. pp. 207-210
- Hou P-C. L., X. Zou, C-Y. Huang & H-J. Chien.** 2005. Plant litter decomposition influenced by soil animals and disturbance in a subtropical rainforest of Taiwan. *Pedobiologia* 49:539-547
- Howell, D.C.** 2002. Statistical methods for psychology. Pacific Grove ed., California, 802 pp.
- Instituto de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).** 2004. <http://galileo.inegi.gob.mx/website/mexico/viewer.htm?c=423>
- Irmeler, U.** 2006. Climatic and litter fall effects on collembolan and oribatid mite species and communities in a beech Wood base don a 7 years investigation. *European journal of soil biology* 42:51-62
- Janssens, F.** 2007. <http://www.collembola.org/taxa/collembo.htm> - Julio del 2007
- Jensen, P., G. L. Jacobson & D. E. Willard.** 1973. Effects of mowing and raking on collembola. *Ecology* 54:3
- Jing, S., T. Solhøy, W. Huifu, T. I. Vollant & X. Rumei.** 2005. Differences in soil arthropods communities along a high altitude gradient at Shergyla Mountain, Tibet, China. *Arctic, Antarctic, and Alpine Reseach*, 37:261-266.
- Jordana, R., Arbea J. I., Simón C. & Lucíañez M.** 1997. Collembola Poduromorpha. In Ramos M. A., *et al.* (Edits): Fauna Ibérica Vol. 8. Museo Nacional de Ciencias Naturales, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, España 807 pp.
- Kaneko, N., M. A. McLean & D. Parkinson.** 1998. Do mites and collembola affect pine litter fungal biomass and microbial respiration?. *Applied Soil Ecology*, 9:209-213.
- Krebs, C. J.** 1985. *Ecología, estudio de la distribución y abundancia*. 2^{da} edición. Edit. Harla México. 1357 pp.

- Larsen, T., P. Schjønning, & J. Axelsen.** 2003. The impact of soil compaction on euedaphic collembola. *Applied Soil Ecology*, 26:273-281
- Lechevallier, C.** 1995. La matière organique des sols. *La lettre d'information du laboratoire d'analyses et de conseils agronomiques de Bordeaux-Blanquefort*, 3:2-4.
- Liu, W., J. E. D. Fox & Z. Xiu.** 2000. Leaf litter decomposition of canopy trees, bamboo and moss in a montane moist evergreen broad-leaved forest on Ailao Mountain, Yunnan, South-west China. *Ecological Research* 15: 435-447.
- Loranger, G. I., K. S. Pregitzer & J. S. King.** 2004. Elevated CO₂ and O_{3t} concentrations differentially affect selected groups of the fauna in temperate forest soils. *Soil Biology & Biochemistry* 36:1521-1524.
- Llorente, M.** 2002. Formaciones superficiales. *Resumen del Manual de Edafología*. Universidad de Salamanca. España.
- López, L. A.** 1995. http://iztapopo.conanp.gob.mx/ubic_geog 25-Nov-2003
- Lorenzo, J. L.** 1959. Los glaciares de México. *Instituto de Geofísica, Monografía 1*. Universidad Nacional Autónoma de México. 35 pp.
- Luciañez, M. J. & J. C. Simón.** 1991. Estudio de la variación estacional de la colembofauna en suelos de alta montaña en la sierra de Guadarrama (Madrid). *Miscelánea Zoológica*, 15:103-113
- Magurran, A. E.** 1988. *Ecological Diversity and its Measurement*. Princeton University Press, New Jersey. 325 pp.
- Mari Mutt, J.A. & J.G. Palacios-Vargas.** 1987. *Americabrya*, a new genus of Entomobryidae (Collembola), with a redescription of *A. arida* (Christianson(sic) and Bellingier) based on Mexican specimens and descriptive notes for *A. epiphyta* (Loring)., *J. New York Entomol. Soc.*, 95 (1), 1987, p.99-108.
- Mateos, E.** 1988. Ecología de los colémbolos (colembola, insecta) edáficos del encinar montano del Montseny (Barcelona). *Miscelánea Zoológica*, 12:97-107
- Mayhew, L.** 2004. Humic substances in biological agricultura. *A voice for Eco-agriculture* 34.
- Mebes, K. & J. Filser.** 1998. Does the species composition of collembola affect nitrogen turnover? *Applied Soil Ecology*, 9:241-247.
- Miranda, F.** 1947. Estudios sobre la vegetación de México. 5. Rasgos de la vegetación en la Cuenca del Río Balsas. *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural*, 8: 95-114.

- Montero, G. I.** 2000 www.montero.org.mx/iztaccihuatl.htm 30-Nov-2003
- Niinistö, S. M., J. Silvota & S. Kellomäki.** 2004, Soil CO₂ efflux in a boreal pine forest under atmospheric CO₂ enrichment and air warming. *Global Change Biology*. 10: 1363-1376.
- O'Donnell, S. & A. Kumar.** 2006. Microclimatic factors associated with elevational changes in army ant density in tropical montane forest. *Ecological Entomology*, 31:491-498.
- Palacios-Vargas, J.G.** 1982. On *Friezea* (Collembola: Neanuridae) from Mexico and description of a new species in the genus. *Journal of the Kansas Entomological Society*, 55: 46-51.
- Palacios-Vargas, J. G.** 1985. Artrópodos del Popocatepetl. *Tesis de doctorado*. Facultad de Ciencias. UNAM. 185 pp.
- Palacios Vargas, J. G.** 2002 Los "insectos" (Hexapoda: Collembola) sin alas en las cuevas del mundo. *Mundos Subterráneos*, 13:83-91.
- Palacios-Vargas, J. G.** 2003. Los microartrópodos (Collembola) de la selva tropical húmeda. en *Ecología del suelo en la selva tropical húmeda de México*. edit. Álvarez-Sánchez, J. & E. Naranjo-García. Instituto de Biología/Instituto de Ecología, México-Xalapa, UNAM. 302 pp.
- Palacios-Vargas, J. G. & G. Castaño-Meneses.** 2002. Collembola associated with *Tillandsia violacea* (Bromeliaceae) in Mexican Quercus-Abies forest. *Pedobiología* 46:395-403
- Palacios-Vargas, J. G. & G. Castaño-Meneses.** 2003. *Seasonality and community composition of springtails in Mexican forest*, en *Arthropods of tropical forests*, Basset, Y., V. Novotny, S. Miller & R. Kitching (ED). Cambridge, U.K., 159-169.
- Paquin, P. & Coderre D.** 1997. Changes in soil macroarthropod communities in relation to forest maturation through three successional stages in the Canadian boreal forest. *Oecologia*, 112:104-111
- Parkinson, D., S. Visser, & J. B. Whitaker.** 1979. Effects of collembolan grazing on fungal colonization of leaf litter. *Soil Biology and Biochemistry*, 11:529-535.
- Peña-Méndez, E. M., J. Havel & J. Patočka.** 2005. Humic substances –compounds of still unknown structure: applications in agriculture, industry, environment, and biomedicine. *Journal of applied biomedicine* 3:13-24.

- Ping-Chun L. H., Z. Xiaoming, H. Ching-Yu & C. Hao-Jian.** 2005. Plant litter decomposition influenced by soil animals and disturbance in a subtropical rainforest of Taiwan. *Pedobiologia* 49:539-547.
- Porta, C. J., López-Acevedo R, M. & Roquero, D, C.** 1999. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Mundi-Prensa, España 848 pp.
- Prause, J., A. P. de Lifschitz 1 & D. M. Toledo** 2003. Dinámica de la mineralización de N, P, y K en hojas de *Schinopsis balansae* Engl. Sobre el suelo forestal del Parque Chaqueño Húmedo. *Quebracho*, 10:46-52.
- Prieto, T. D., M. M. G. Vázquez & C. A. Rodríguez.** 1999. Comunidades de la mesofauna edáfica en una selva baja inundable de la reserva de la biósfera de Sian Kaan, Quintana Roo, México. *Revista de biología tropical* 47:489-492
- Prinzing, A. & S. Woas.** 2003. Habitat use stratification of Collembola and oribatid mites. En: Arthropods of tropical forest ; spatio-temporal dynamics and resource use in the canopy. Basset, Y., V. Novotny, S. E. Miller & R. L. Kitching (eds.). Cambridge University Press. pp. 271-281.
- Rzedowski, J.** 1994. Vegetación de México. Limusa. Noriega. Eds. México. 432 pp.
- Rusek, J.** 1998. Biodiversity of collembola and their functional role in the ecosystem. *Biodiversity and Conservation*, 7:1207-1219.
- Rusek, J. & V. G. Marshall.** 2000. Impacts of airborne pollutants on soil fauna. *Annual Review of Ecology and Systematics* 31:395-423.
- Sadaka, N. & J. F. Ponge.** 2003. Soil animal communities in holm oak forests: influence of horizon, altitude and year. *European journal of soil biology*. 39:197-207.
- Sánchez M. A. V.** 1999. Revisión del género *Megalothorax* (Collembola: Neelidae) en México. *Tesis de licenciatura*, Facultad de Ciencias, UNAM. México, 70 pp.
- Sariyildiz, T., J. M. Anderson & M. Kucuk.** 2005. Effects of tree species and topography on soil chemistry, litter quality, and decomposition in Northeast Turkey. *Soil biology & biochemistry* 37:1695-1706
- Scout, N. A., & D. Binkley.** 1997. Foliage litter quality and annual net N mineralization: comparison across North American forest sites. *Oecologia* 111: 151-159
- Shanks, R. E. & J. S. Olson.** 1961. First year breakdown of leaf litter in Southern Appalachian forest. *Science*, 134:194-195.

- Schowalter, T. D.** 2006. Insect ecology, an ecosystem approach. Academic press, Canada. Second Edition 572 pp.
- StatSoft, Inc.** 1995. Statistical user guide. Complete Statistical System Statsoft. Oklahoma.
- Stevens, G. C.** 1992. The elevational gradient in altitudinal range: an extension of rapoport's latitudinal rule to altitude. *The American Naturalist*. 140:893-911.
- Ter Braak, C. J. K., & Smilauer, P.,** 1998. CANOCO Referente Manual and User's Guide to Canoco for Windows: Software for Canonical Community Ordination (Versión 4). Micropunter Power, Ithaca, NY, USA, 352 pp.
- Thaiutsa, B. & O. Granger.** 2000. El clima y la descomposición de la hojarasca en el bosque tropical. www.fao.org/docrep/n68455/n68455s00.htm 4-Mayo-2004.
- Tissaux, J. C.** 1996. Une revue bibliographique des principaux mécanismes pédogénétiques pour caractériser le rôle du bois raméal fragmenté (BRF) dans le processus d'humification. *Mémoire de fin d'étude 60*. Département des Sciences du Bois et de la Forêt. Université Laval. Canada.
- Van-Reeuwijk, L. P.** 2002. Procedures for soil analysis International Soil Reference and information Centre, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Sixth Edition. 112 pp.
- Van Stralen, N. M.** 1997. The development of a bioindicator system for soil acidity based on arthropod pH preferences. *Journal of Applied Ecology* 34: 217-232
- Williams, S. T. & T. R. G. Gray.** 1974. Decomposition of litter on soil surface. In *Biology of litter decomposition*. pp?? Vol. II, C. H. Dickinson & G. J. E. Pugh. Ed New York, Academic Press.
- Wilson, E. O.** 1994. *La diversidad de la vida*. Crítica, Grijalbo-Mondadori, Barcelona 411 pp.
- Zar, J. H.** 1984. Biostatistical Analysis. Prentice-Hall, Englewood Clif, Nueva Jersey. 545 pp.

11 Apéndice I

Análisis de varianza de tres vías, de los factores abióticos y densidad total de colémbolos.

Temperatura			
Factor	g. l.	F	p
Altitud	3	32.7	**
Biotopo	1	1187.3	**
fecha de colecta	3	112.4	**
Altitud*Biotopo	3	16.5	**
Altitud*fecha de colecta	9	3.9	**
Biotopo*fecha de colecta	3	181.6	**
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	9.3	**
Humedad			
Altitud	3	20	**
Biotopo	1	0	n.s.
fecha de colecta	3	2203.2	**
Altitud*Biotopo	3	0	n.s.
Altitud*fecha de colecta	9	116.1	**
Biotopo*fecha de colecta	3	0	n.s.
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	0	n.s.
CO₂			
Altitud	3	572.8	**
Biotopo	1	0	n.s.
fecha de colecta	3	35.9	**
Altitud*Biotopo	3	0	n.s.
Altitud*fecha de colecta	9	43.3	**
Biotopo*fecha de colecta	3	0	n.s.
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	0	n.s.
pH agua			
Altitud	3	27.5	**
Biotopo	1	0	n.s.
fecha de colecta	3	3.6	**
Altitud*Biotopo	3	0	n.s.
Altitud*fecha de colecta	9	8.5	**
Biotopo*fecha de colecta	3	0	n.s.
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	0	n.s.
pH KCl			
Altitud	3	48.1	**
Biotopo	1	0	n.s.
fecha de colecta	3	5.4	**
Altitud*Biotopo	3	0	n.s.
Altitud*fecha de colecta	9	19.07	**
Biotopo*fecha de colecta	3	0	n.s.
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	0	n.s.
Carbono			
Altitud	3	19.2	**
Biotopo	1	0	n.s.
fecha de colecta	3	30.9	**
Altitud*Biotopo	3	0	n.s.
Altitud*fecha de colecta	9	3.8	**
Biotopo*fecha de colecta	3	0	n.s.
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	0	n.s.
Organismos totales			
Altitud	3	5.04	**
Biotopo	1	0.12	n.s.
fecha de colecta	3	31.3	**
Altitud*Biotopo	3	3.9	**
Altitud*fecha de colecta	9	9.2	**
Biotopo*fecha de colecta	3	12.8	**
Altitud*Biotopo*fecha de colecta	9	3.3	**