



**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO**

**Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales**

**Efectos del Incremento de la Temperatura y las Quemadas sobre la  
Mesofauna (Artrópodos) del Suelo y la Descomposición de Hojarasca en  
un Ecosistema de Páramo en el Norte del Ecuador**

**Andrea Isabel Salcedo R.**

**Esteban Suárez, Ph.D.,** Director de Tesis

Tesis de grado presentada como requisito  
para la obtención del título de Licenciada en Ecología Aplicada

Quito, mayo de 2014

**Universidad San Francisco de Quito**

**Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales**

**HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS**

**Efectos del Incremento de la Temperatura y las Quemas sobre la  
Mesofauna (Artrópodos) del Suelo y la Descomposición de Hojarasca en  
un Ecosistema de Páramo en el Norte del Ecuador**

**Andrea Isabel Salcedo Raza**

Esteban Suárez R., Ph.D.  
Director de Tesis .....

Andrea Encalada, Ph.D.  
Miembro del Comité de Tesis .....

Kelly Swing, Ph.D.  
Miembro del Comité de Tesis .....

Stella de la Torre, Ph.D.  
Decana del Colegio de Ciencias  
Biológicas y Ambientales .....

Quito, mayo de 2014

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma: \_\_\_\_\_

Nombre: Andrea Isabel Salcedo R.

C. I.: 171966770-9

Lugar: Quito, mayo de 2014

## **DEDICATORIA**

Este trabajo está dedicado a mis hermanas Laura y María Gabriela. Somos la semilla del cambio como nos ha enseñado mi padre. Nunca se puede hacer suficiente para convertir este mundo en un lugar mejor. También se lo dedico a mi Mamá; gracias por todo el apoyo incondicional y por la seguridad que me has inculcado para enfrentar al mundo.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco principalmente a Esteban Suárez, mi director de Tesis, por su guía y apoyo.

También agradezco a la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo por los fondos brindados para el proyecto: A/023862/09. Agradezco a mi comité de revisión de Tesis por los valiosos aportes a mi estudio y a todos mis compañeros que me acompañaron en el trabajo de campo.

## RESUMEN

Los páramos son ecosistemas altoandinos que están caracterizados por sus condiciones geográficas y climáticas extremas, las cuales permiten altas de endemismo y acumulación de materia orgánica. El páramo es un ecosistema de importancia porque regula el agua que desciende hacia los valles aledaños a los Andes. Estas características hacen del páramo un ecosistema sensible frente a los efectos del cambio climático y antropogénicos. En este contexto nuestro estudio pretende analizar la interacción entre los efectos del aumento de temperatura y la quema sobre la mesofauna del suelo y la descomposición de hojarasca. Nuestros datos muestran claros cambios sobre la diversidad y abundancia de la mesofauna, sin embargo la descomposición disminuyó cuando aumentó la temperatura. Los datos siguen el patrón de la Hipótesis de disturbio intermedio, esto puede ser causado porque cuando la especie dominante disminuye en tamaño permite a otras especies ocupar un recurso antes escaso. Este estudio nos indica que las interrelaciones entre los elementos del ecosistema son estrechas y cuando se altera un factor puede cambiar los procesos ecológicos. Recomendamos realizar estudios que determinen los efectos a los que el páramo ya se enfrenta para tener un mejor entendimiento de cómo el cambio climático podría afectarlo.

## **ABSTRACT**

Paramos are high altitude tropical ecosystems in the Andes that has extreme geographical and climatic conditions, which promotes high rates of endemism and great accumulation of organic matter. Paramos are of great importance for the valleys in the Andean slopes because they allow the water regulation. These features make of the Paramo a sensitive ecosystem to climate changes and human-caused disturbances (burning). In this context our study aims to analyze the possible effects of the interaction between burning and increased temperature on soil invertebrates and litter decomposition. Our data show clear changes on the diversity and abundance of mesofauna; however decomposition decreased as the temperature increased. The data on invertebrates follows the pattern of the intermediate disturbance hypothesis; this can be caused because when the dominant species abundance decreases allows new species to occupy a resource. This study indicates that the interrelationships between the elements of the ecosystem are narrow and when a factor is altered it can change ecological processes. We recommend new studies to determine the impacts that Paramo is facing at the time to have a better understanding of how climate change could affect it.

## Tabla de Contenido

RESUMEN .....	7
ABSTRACT .....	8
INTRODUCCIÓN.....	1
METODOLOGÍA.....	14
RESULTADOS .....	18
DISCUSIÓN.....	21
LITERATURA .....	27
TABLAS Y FIGURAS .....	30

## Lista de Tablas y Figuras

<b>Tabla 1.</b> Resultados del conteo total de especies y de individuos por tratamientos y por profundidades.....	30
<b>Figura 1.</b> Foto de una de las cámaras. Se observa la forma y cómo las paredes están inclinadas hacia adentro .....	31
<b>Figura 2.</b> Este gráfico muestra el número de especies (media $\pm$ DE) encontradas en cada tratamiento en la profundidad de 0-4 cm. Cada uno de los 4 tratamientos tiene 6 réplicas- a: tratamiento/quema; b: calentamiento/sin quema; c: sin calentamiento/con quema, d: sin calentamiento/sin quema.....	32
<b>Figura 3.</b> Número de especies (media $\pm$ DE) encontradas en cada tratamiento en la profundidad de 4-8 cm. Cada tratamiento tiene 6 réplicas. a: tratamiento+quema; b: calentamiento/sin quema; c: sin calentamiento/con quema, d: sin calentamiento/sin quema. ....	34
<b>Figura 4.</b> Porcentaje de la hojarasca remanente de acuerdo con el tratamiento de cada parcela.....	36
<b>Figura 5.</b> Tasa de Descomposición de Hojarasca (%/mes) medida en varios sitios del DMQ.....	37
<b>Figura 6.</b> Comparación del cambio de temperatura en °C del aire entre el día y la noche, y entre los cuatro diferentes tratamientos.....	38

## INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas tropicales húmedos altoandinos, también llamados páramos, han sido reconocidos como un sistema de alta importancia para la conservación de la biodiversidad y los procesos biológicos (Buytaert *et al.* 2011, Mena and Hofstede 2006). Por ejemplo, debido a las características geográficas y a las condiciones climáticas extremas (baja presión atmosférica, fluctuaciones diarias y bruscas de temperatura, radiación intensa de luz, fuertes vientos) los organismos de este ecosistema exhiben altas tasas de evolución y niveles de endemismo de hasta 60% (Buytaert *et al.* 2011, Madriñán *et al.* 2013). Pero además de su importancia biológica, los páramos son un sistema prioritario desde el punto de vista de la provisión de servicios ambientales (Luteyn 1992, Buytaert *et al.* 2006, Madriñán *et al.* 2013). Debido a su clima predominantemente frío y bajas tasas de descomposición, los suelos de los páramos tienden a acumular grandes cantidades de materia orgánica (Poulenard *et al.* 2003, Podwojewski and Poulenard 2004), lo que les permite retener una gran cantidad de agua en turberas, pantanos, lagunas, etc., que luego baja hacia los valles (Hofstede y Sevink 1995, Josse *et al.* 1999, Buytaert *et al.* 2007). Debido a estas características, los páramos se han convertido en ecosistemas estratégicos, no solo por proveer agua a grandes sectores agrícolas e industriales, sino también por alimentar los sistemas de agua potable para millones de personas a través de los Andes del norte. Pero a pesar de su importancia, aún es poco lo que se conoce acerca de los impactos que el calentamiento global podría tener sobre la estructura y funcionamiento de este ecosistema.

El calentamiento global ha generado cambios importantes en diferentes ecosistemas. En el último siglo, la media global de la temperatura de la Tierra ha subido aproximadamente 0,6 +/- 0,2°C, y estudios del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) predicen, en diferentes escenarios, que la Tierra se calentará en 1.5°C hasta el año 2100 (Kappelle *et al.* 1999, IPCC 2013). Las proyecciones sobre estas alteraciones muestran que el cambio climático afectará a todos los ecosistemas, sin embargo la mayor parte de los modelos sugieren que, por su topografía y climas extremos, los ecosistemas de altura son mucho más sensibles (Klanderud y Totland 2005, Buytaert *et al.* 2011). Por ejemplo, algunos estudios afirman que el cambio climático desplazará las barreras de los ecosistemas y reducirá el área total de los ecosistemas de altura (Buytaert *et al.* 2011). Este desplazamiento creará efectos de aislamiento lo que inducirá a la extinción de diversas especies, pérdida de biodiversidad y de servicios ambientales (Aerts 2006, Buytaert *et al.* 2011). Pero además de los impactos directos del cambio climático, se estima que este fenómeno podría interactuar con otras alteraciones antropogénicas como las quemas y la ganadería, generando impactos que aun no han sido evaluados.

La ganadería y agricultura son impactos significativos para los páramos (Poulenard *et al.* 2001, Suárez & Medina 2001, Podwojewski *et al.* 2008, Hofstede *et al.* 2003). En el Ecuador, se ha estimado que de 20000 km<sup>2</sup> que podrían ser ocupados por páramos, el 40% ha sido transformado en cultivos, pastos sembrados o tierras erosionadas y el 30% está convertido en pastizales monótonos que se queman regularmente y sufren pastoreo moderado (Hofstede *et al.* 2003). La quema es utilizada como una práctica tradicional en la que el fuego consume la biomasa aérea de las plantas e induce el crecimiento de hojas nuevas que sirven de alimento para el ganado. Estas quemas pueden producir pérdida y volatilización de nutrientes y minerales, erosión del suelo, pérdida del estrato bajo la

vegetación y desecación (Hofstede 1995, Hofstede *et al.* 1995, Ramsay y Oxley 1996, Suárez y Medina 2001, Aguirre 2000). El resultado es una mezcla de parches de vegetación en diferentes etapas de regeneración. En el páramo de los Nevados (Colombia), por ejemplo, se ha observado que la quema y el forrajeo provocaron diferencias significativas en la estructura de la vegetación explicados por cambios en las propiedades físicas del suelo (compactación y pérdida de humedad) (Hofstede 1995). Por su naturaleza, estos cambios podrían ser mucho más graves bajo escenarios de cambio climático en los que el incremento de la temperatura y los cambios en precipitación podrían acelerar los procesos de degradación del suelo. A pesar de la potencial importancia de estos cambios, aun es poco lo que se conoce sobre los posibles efectos interactivos que las quemaduras podrían tener con los cambios globales del clima.

Sobre el cambio climático en ecosistemas de montaña, estudios anteriores sugieren que afectará la estructura de las comunidades vegetales en el ecosistema perturbando también la composición y distribución de organismos más complejos que dependen de estas (Klanderud & Totland 2005). En estudios donde se manipularon condiciones como la luz, la temperatura, nutrientes y humedad se ha reportado una alteración en la disponibilidad de nutrientes, producción primaria neta y riqueza de especies, indicando que la vegetación de altura es sensible a este tipo de cambios climáticos (Shaver *et al.* 1995). La estructura de la comunidad vegetal también se ve afectada. Por ejemplo, en un estudio realizado en la tundra ártica, se reportó que la temperatura afecta a la cobertura de gramíneas y arbustos deciduos y disminuye el porcentaje de líquenes y musgos (Walker *et al.* 2006). Sin embargo, poco se sabe sobre los efectos que tendrán sobre organismos menos visibles como los invertebrados terrestres. En estos ecosistemas, los artrópodos del suelo, junto con otros invertebrados, son responsables de realizar la primera fase de la descomposición de la

materia orgánica (Aerts 2006), en la que la hojarasca es fragmentada por estos detritívoros en pedazos pequeños que luego son químicamente reducidos/descompuestos por bacterias y hongos (Aerts 2006, Swift *et al.* 1979). Al ocurrir cerca de la superficie del suelo, las primeras fases de la descomposición de la materia orgánica deben ser susceptibles a los cambios microclimáticos asociados a las quemas y otras actividades antropogénicas. Por ejemplo, el aumento de temperatura y la desecación del suelo asociado a actividades agrícolas o ganaderas en el páramo, podría afectar la composición de la comunidad de detritívoros y los procesos de descomposición.

A pesar de la potencial importancia de estos cambios, su dirección y magnitud son difíciles de pronosticar, especialmente en ambientes con climas extremos como los páramos donde la actividad de los organismos puede estar limitada por las condiciones ambientales. En este contexto, el presente estudio tiene como propósito analizar experimentalmente los posibles efectos interactivos de las quemas y el calentamiento sobre la diversidad y abundancia de la mesofauna y la descomposición de hojarasca en el suelo de una localidad de páramo en el norte del Ecuador.

## **METODOLOGÍA**

Realizamos este estudio en el páramo de El Ángel, ubicado en la provincia de Carchi, región Sierra al norte de Ecuador. Específicamente, el sitio de estudio se encuentra en el área de influencia de la Reserva Ecológica El Ángel, un área protegida con una extensión de 16541 ha (Ministerio del Ambiente del Ecuador 2008). La vegetación del área corresponde a un páramo húmedo donde predomina el frailejón (*Espeletia pycnophylla*), los pajonales de *Calamagrostis* sp. y diversas especies de estrato arbustivo como *Pentacalia peruviana*, *Diplostegium ericoides*, *Weimannia fagaroides*, y *Blechnum* sp.

(Ministerio del Ambiente del Ecuador 2008). El rango altitudinal va desde los 3400 hasta los 4200 m, aunque el trabajo de campo se realizó a los 4000 m. Esta reserva presenta una temperatura promedio entre 5° y 6°C y sus registros de precipitación son de 300 a 2000 mm. La humedad relativa es siempre superior al 80% (Coello 1994).

Para caracterizar los posibles efectos interactivos de las quemas y el calentamiento, utilizamos la metodología de cámaras abiertas de calentamiento desarrollada por la iniciativa ITEX (Molau and Molgaard 1996). Esta metodología está basada en el incremento artificial de la temperatura ambiental en parcelas pequeñas, mediante la instalación de cámaras de calentamiento (“open-top chambers”) de policarbonato transparente (Figura 1). Estas cámaras son construidas con láminas transparentes de policarbonato (Marlo FSX) de 80 cm de alto y 120 cm de largo y aumentan la temperatura ambiental de forma pasiva en un promedio de 1,5 °C a 2 °C (Marion et al. 1997). El material del que están hechas las cámaras tiene alta transmitancia de la longitud de onda visible y poca transmitancia en el rango infra-rojo (Giles 2000). Las paredes del hexágono son inclinadas hacia adentro para mantener el calor dentro de la cámara (a manera de un invernadero) y para que favorezca la transmisión de radiación solar dentro de la cámara (Giles 2000).

Para este estudio seleccionamos 24 parcelas dónde aplicamos aleatoriamente cuatro tratamientos (seis parcelas por tratamiento) para simular efectos individuales o combinados del cambio climático y de quema controlada. En los tratamientos que requerían el incremento experimental de la temperatura, instalamos cámaras de calentamiento durante la tercera semana de agosto del 2010, mientras que las parcelas que fueron asignadas a los tratamientos de quema fueron incendiadas controladamente el 31 de agosto y nuevamente

el 28 de septiembre del 2010. Por su parte, las parcelas que no fueron asignadas a los tratamientos de calentamiento, fueron cercadas con una malla de alambre de gallinero para (ojo de malla 1 cm), para evitar el impacto potencial de herbívoros (especialmente conejos) imitando la barrera física que significa la construcción de las cámaras de calentamiento en las otras parcelas.

Para caracterizar los efectos de los tratamientos sobre la temperatura, utilizamos termómetros automáticos (HOBO U23 Prov2 External Temperature Data Logger -U23-004; Onset Computer Corp. Cape Cod, MA, USA). El sensor principal de cada termómetro fue ubicado en una estaca a 35 cm del suelo en el centro de cada parcela, mientras que el sensor secundario fue enterrado 5 cm en el suelo bajo el sensor principal. Colocamos tres termómetros por cada tratamiento en parcelas seleccionadas aleatoriamente y registramos mediciones simultáneas cada 30 minutos entre el 15 de diciembre de 2011 y el 28 de febrero de 2012.

Para extraer los artrópodos de páramo de cada parcela obtuvimos tres muestras de tierra con la ayuda de un tubo de metal o barreno dividido en dos profundidades (0 a 4 cm y 4 a 8 cm). Se procuró tomar las muestras en el centro de cada parcela para mantener en todas las muestras las mismas condiciones de viento y lluvia. Transportamos las muestras en neveras (*coolers*) portátiles cuya temperatura fue mantenida aproximadamente a 7°C mediante hielos artificiales (*blue ice*), para evitar posible estrés en los invertebrados por los cambios bruscos de temperatura).

Para extraer los artrópodos de las muestras de tierra elaboramos embudos Berlese (Karyanto *et al.* 2012). Estos fueron construidos a partir de botellas de plástico (20 cm de diámetro) y malla plástica (3mm de poro), y fueron colocados bajo la luz de un foco de 50

vativos. El tiempo que permanecieron bajo la luz fue de 48 horas, y los artrópodos se recogieron en frascos con alcohol al 70%. Una vez colectados los invertebrados, limpiamos las muestras retirando a todos los animales visibles bajo el estéreo-microscopio (Olympus SZ40). Antes de la clasificación, todos los invertebrados fueron agrupados en morfoespecies y posteriormente utilizamos claves taxonómicas para su identificación. El orden de dípteros fue el que más familias identificadas tuvo, con excepción de aquellos individuos que se encontraban en etapa de larva, también encontramos las familias para los Hemípteros. A los grupos de coleópteros, Thysanoptera, Diplura, ácaros, ortópteros y arañas los separamos únicamente por morfoespecies. En los colémbolos pudimos llegar a la familia pero dentro de esta la separamos en 3 morfoespecies.

Para caracterizar posibles diferencias en las tasas de descomposición de hojarasca en cada tratamiento, utilizamos una metodología estándar de bolsas de hojarasca. Para este estudio fabricamos un total de 96 bolsas de nylon (ojo de malla 1 cm) las cuales fueron llenadas con aproximadamente 3 g de hojas de chilca (*Baccharis latifolia*), que previamente habían sido secadas al aire. Las bolsas fueron etiquetadas individualmente, y cuatro de ellas colocadas en el centro cada una de las parcelas, tratando de que su ubicación simulara la disposición natural de la hojarasca en el suelo. Las bolsas permanecieron en el campo por un período de 90 días, tras el cual fueron colectadas, transportadas al laboratorio, secadas en un horno a 65 °C por 24 horas, y pesadas para la determinación del porcentaje de hojarasca remanente. Todos los cálculos del porcentaje de hojarasca remanente fueron corregidos por contenido de humedad y por posible pérdida de hojarasca por manipulación.

Para los datos de descomposición de hojarasca realizamos un ANOVA multifactorial en StatView, para determinar si existe un efecto significativo de cada factor (quema o calentamiento).

## RESULTADOS

En la profundidad de 0-4 cm, encontramos el mayor número de morfoespecies (33) y el mayor número de individuos (566) (Tabla 1). A esta profundidad, la diversidad de morfoespecies fue mayor en los tratamientos que poseen uno de los dos efectos bien sea el aumento de temperatura a través de la cámara o la quema controlada (Fig. 1). Estos tratamientos tuvieron un mayor número de especies y una distribución más equitativa de la abundancia de individuos. En particular, en el tratamiento de quema registramos un total de 21 especies, riqueza que fue 1,75 y 2,3 veces mayor que la riqueza en los tratamientos de quema/calentamiento y control, respectivamente (Tabla 1). De igual manera, el tratamiento de quema tuvo la mayor abundancia de individuos (222 individuos) que fue entre 1,5 y 3 veces mayor que la abundancia de individuos en las muestras de los otros tratamientos (Fig. 2).

En el tratamiento de quema controlada (número total de especies 21; número total de individuos 222) la especie más numerosa fue el ácaro 2 que representó el 36% ( $13,17 \pm 6,94$ ) del total de individuos encontrados en este tratamiento. Además de esta, se destacan tres morfoespecies que son ácaro 1 (26%;  $9,5 \pm 6,9$ ), Isotomidae 1 (18%;  $6,5 \pm 9,25$ ), e Isópoda 1 (8%;  $3 \pm 2,19$ ) (Figura 2). En el siguiente tratamiento con mayor número de especies (solo calentamiento; número total de especies 17; número total de individuos 129), las morfoespecies más abundantes fueron el ácaro 2 (28%;  $6 \pm 10,02$ ), e Isópoda 1 (28%;  $6 \pm 8,70$ ) (Figura 2).

En el tratamiento de calentamiento/quema registramos un total de 12 especies y 75 individuos, siendo la morfo-especie ácaro 2 la más abundante (51%;  $6,33 \pm 4,23$ ), seguida de isópoda 1 (17%;  $2,17 \pm 2,79$ ) y de ácaro 1 (12%;  $1,5 \pm 1,23$ ). El tratamiento con menor número de especies fue el tratamiento que no poseía disturbio alguno, es decir el control (número de especies 9, número de individuos 140), siendo el ácaro 2 el más abundante (48%;  $11,17 \pm 13,45$ ), seguido por el ácaro 1 (18%;  $4,17 \pm 5,38$ ), Isópoda 1 (11%;  $2,5 \pm 2,8$ ) e Isotomidae1 (11%;  $2,5 \pm 3,21$ ) (Figura 2).

En la profundidad de 4-8 cm el número de especies fue mucho menor que en la capa de 0-4 cm, y la abundancia de individuos fue 14 veces menor (número de especies 21; número de individuos 39). A esta profundidad, las diferencias entre tratamientos fueron menores que en la capa más superficial, con la excepción del tratamiento de calentamiento (sin quema) en donde el número de especies (12 especies) e individuos (14 individuos) fue por lo menos dos veces mayor que en el tratamiento de quema (cuatro especies y siete individuos). Las dos más abundantes son una morfo-especie de Staphylinidae (14%;  $0,3 \pm 0,5$ ) y ácaro 2 (14%;  $0,3 \pm 0,8$ ) (Figura 3).

El segundo tratamiento con mayor número de especies fue el que poseía los dos disturbios, tanto quema como calentamiento, en donde encontramos ocho especies y un total de nueve individuos. La especie de Cecydomyiidae es la más abundante con dos individuos (22%;  $0,3 \pm 0,5$ ) y el resto posee únicamente uno ( $0,2 \pm 0,4$ ). En el tratamiento de control encontramos siete especies y nueve individuos, siendo Phoridae (22%;  $0,3 \pm 0,5$ ) e Isotomidae (22%;  $0,3 \pm 0,8$ ) las más abundantes con dos individuos cada una. El resto de especies posee solo un individuo ( $0,2 \pm 0,4$ ) (Figura 3).

Las parcelas con el tratamiento de quema controlada presentaron el menor número de especies (cuatro) y solamente siete individuos. Las especies más abundantes fueron Cecydomyiidae (43%;  $0,5 \pm 1,2$ ) e Isotomidae 1 (29%;  $0,3 \pm 0,8$ ) (Figura 3).

En cuanto a la descomposición de hojarasca los tratamientos que fueron calentados con las cámaras (con o sin quema) tuvieron tasas de descomposición entre 3 y 4% más lentas que los tratamientos que no fueron calentados con cámaras. El tratamiento con la descomposición más lenta (mayor porcentaje de hojarasca remanente) fue el de cámara/quema ( $54,5\% \pm 1,38$ ), mientras que la mayor descomposición se registró en las parcelas con el tratamiento control ( $49,7\% \pm 1,2$ ; Figura 4). Sin embargo, en el análisis del ANOVA multifactorial, no encontramos significancia para el tratamiento de cámaras ( $F_{(1,83)}=9,23$ ;  $p < .01$ ) y tampoco fueron significativos los resultados de la interacción ( $F_{(1,83)}=9,67$ ;  $p=0,61$ ), pero para el tratamiento de quema se encontró significancia ( $F_{(1,83)}=0,49$ ;  $p=0,49$ ) en este análisis, lo que nos lleva a suponer que el tratamiento de quema si altera la tasa de descomposición disminuyéndola.

Los datos de temperatura colectados durante la primera fase (Figura 5) muestran que las cámaras fueron efectivas en términos de modificar la temperatura ambiental. En promedio, estas variables se incrementaron entre  $0,89$  °C y  $2,06$  °C durante el día y entre  $0,66$  °C y  $0,86$  °C durante la noche. Asimismo, la temperatura del suelo en las cámaras de calentamiento, fue mayor que en las parcelas que no fueron cubiertas, confirmando la efectividad de las cámaras.

La diferencia de temperatura entre el suelo y el aire fue significativamente diferente, así también como el cambio de temperatura entre los tratamientos (Figura 6). La temperatura del suelo en todos los tratamientos es en promedio un  $1,5$ °C más alta que la temperatura

del aire. En el suelo, el efecto de las cámaras elevó la temperatura en 1,34°C (en comparación con el control). Además la quema controlada también aumentó la temperatura del suelo y se observó un efecto sinérgico en las parcelas que poseen tanto la cámara como la quema. Se pudo observar que existe un efecto significativo del tratamiento de las cámaras en la temperatura del aire y del suelo (Figura 6).

## **DISCUSIÓN**

Este estudio tuvo como principal objetivo analizar experimentalmente los posibles efectos interactivos de las quemas y el calentamiento sobre la diversidad y abundancia de la mesofauna y la descomposición de hojarasca en el suelo. Nuestros resultados muestran que estos dos tipos de disturbios tienen claros efectos en la composición y estructura de las comunidades de mesofauna del suelo, pero estos cambios no fueron concordantes con los cambios en las tasas de descomposición de hojarasca. Esta diferencia en la respuesta de componentes estructurales y funcionales del ecosistema ante alteraciones como las quemas y el calentamiento enfatizan las complejas interacciones que posiblemente condicionan el comportamiento de los ecosistemas naturales ante el cambio climático. En los siguientes párrafos analizamos algunas implicaciones de estas diferencias y sus implicaciones para el caso de los páramos andinos.

Aerts (2006) advierte que el cambio climático puede afectar de dos maneras a los artrópodos del suelo: a) cambiando la composición de especies y la funcionalidad de las comunidades del suelo y b) afectando la distribución de especies y forzándolas a trasladarse a ambientes más altos. Nuestros datos coinciden con esta conclusión como se puede ver en las comunidades de las parcelas que fueron calentadas con cámaras, las cuales tuvieron un número significativamente mayor de especies e individuos que las

parcelas que no fueron calentadas. En el caso de nuestro estudio, parecería que el incremento de temperatura del suelo, permitió el arribo y establecimiento de un número mayor de especies, lo cual sugiere que las bajas temperaturas del suelo del páramo podrían limitar a ciertas especies de mesofauna. Esta conclusión está apoyada por dos patrones específicos. Por un lado el enriquecimiento de la mesofauna también se observó en las parcelas quemadas, donde la temperatura del suelo también se incrementó, pero como resultado de la remoción de la vegetación. Por otro lado, las especies dominantes de la mesofauna no cambiaron significativamente entre los tratamientos, lo cual indica que los cambios que observamos no constituyen una reorganización total de la comunidad, sino más bien el establecimiento de nuevas especies y el aumento general de la abundancia. En este contexto, nuestro estudio sugiere que, desde la perspectiva de la temperatura del suelo y los cambios en la mesofauna, las quemadas en los ecosistemas de páramo pueden provocar cambios similares a los que se podrían esperar como resultado del incremento de la temperatura ambiental.

Como mencionamos antes, el tratamiento de quema aumentó significativamente la diversidad y abundancia de la mesofauna en comparación al control. Además de la temperatura, este cambio podría deberse a que la quema de la vegetación podría aumentar la disponibilidad de alimento para algunos grupos y permitir el aumento de sus poblaciones. Esta es una posibilidad que no podemos evaluar con nuestros datos pero que debería ser analizada en otros estudios ya que este factor podría determinar posibles efectos interactivos entre los impactos del incremento de la temperatura y de las quemadas. Esto se vuelve más importante si se considera que los estudios sobre los impactos de las quemadas en la fauna del suelo de ecosistemas de páramo han tenido resultados heterogéneos. Así, mientras en nuestro estudio las quemadas llevaron a un enriquecimiento

de la mesofauna de la capa entre 0 a 4 cm, Suárez y Toral (1996) no encontraron diferencias entre las poblaciones de anélidos en lugares con diferentes historias de quema. Por el contrario, Pickett (2001) reportó, también para los páramos de El Ángel, fuertes cambios en la composición de la fauna del suelo en localidades con diferentes edades de regeneración desde la última quema. Estos resultados contrastantes enfatizan la necesidad de entender los factores que controlan los efectos de las quemas como la intensidad del fuego, la frecuencia de las quemas, y la dinámica de la cobertura de vegetación antes y después de los incendios.

Los patrones que observamos en las comunidades de mesofauna parecerían coincidir con la hipótesis del disturbio intermedio, propuesta por primera vez por Hutchinson (1953). Connell (1978) describe esta hipótesis como uno de los mecanismos que explican la alta diversidad de especies en los bosques tropicales lluviosos y los arrecifes de coral, y sugiere que la mayor diversidad se mantiene en escalas intermedias de disturbio. Cuando la magnitud del disturbio es alta, la diversidad disminuye debido a que solo sobreviven aquellas especies que son capaces de reproducirse y alcanzar madurez rápidamente (especies colonizadoras) (Connell 1978). Mientras la frecuencia del disturbio disminuye, en una etapa inicial la diversidad irá aumentando porque más especies que antes no podían llegar a su estado adulto ahora lo lograrán (Connell 1978). Mientras la frecuencia del disturbio se alarga, la diversidad comienza a declinar debido a que: a) el competidor más eficiente en explotar los recursos o en interferir con otras especies eliminará al resto; o b) aunque todas las especies sean buenas competidoras, la que sea más resistente al daño o a enemigos naturales llenará mucho más del espacio (Connell 1978). En el caso de nuestro estudio, las comunidades de mesofauna más pobres ocurrieron en las parcelas donde no había ningún tratamiento, o en donde aplicamos ambos (quemadas y calentamiento). En las

parcelas que solo tuvieron uno de los tratamientos, la disminución de la abundancia de las especies más comunes (ácaro 1, ácaro 2 e Isópoda 1) aparentemente permitió que la diversidad aumente, quizás por la creación de cierta heterogeneidad ambiental, o por la liberación de una porción de recursos que pueden ser aprovechados por otras especies. Se sabe poco sobre redundancia de especies en el páramo pero el aumento en la diversidad podría estar explicado porque quedan nichos libres que pueden ser llenados por especies del mismo gremio que no son tan buenas competidoras como las especies que dominan.

En cuanto a la descomposición de hojarasca nuestros resultados de temperatura y descomposición parecerían ser inconsistentes, ya que los tratamientos con mayor temperatura (con cámaras) fueron al mismo tiempo los que tuvieron menores tasas de descomposición de hojarasca (>5% en relación al control; Figura 3). Este resultado es opuesto al que proponen Buyaert *et al.* (2011) quienes sugieren que el “*aumento de la temperatura acelerará la actividad de microorganismos y hongos provocando una descomposición más rápida*”. Desde esta perspectiva, nuestros resultados sobre descomposición podrían explicarse de dos formas alternativas. Por un lado, podría especularse que el aumento de la temperatura en las parcelas con cámaras hubiera afectado diferencialmente a especies de mesofauna con un papel predominante en la descomposición de hojarasca. Sin embargo, esta explicación no parece probable porque la composición de las especies dominantes no fue diferente entre los tratamientos y, de hecho, las abundancias fueron más altas en los tratamientos con calentamiento. Por otro lado, se podría pensar que el aumento de la temperatura debido a las cámaras desembocó en una disminución de la humedad del suelo, lo que habría provocado una disminución de la actividad de los descomponedores. Aunque no tenemos datos de humedad del suelo para evaluar esta posibilidad, este patrón ya ha sido reportado en otros experimentos de

calentamiento. Por ejemplo, Aerts *et al.* (2006) encontraron que el efecto en la descomposición de hojarasca es negativo para todos los experimentos que usaban cámaras de calentamiento, lo contrario de lo que sucede con otros métodos de calentamiento como lámparas (2006). Estos autores también señalan que la humedad es un factor limitante de la tasa de descomposición en los tratamientos de calentamiento, lo cual implica que aunque la temperatura aumente, la tasa de descomposición aumentará únicamente si el suelo permanece lo suficientemente húmedo (Robinson *et al.* 1995).

En términos generales, nuestro estudio sugiere que los efectos del cambio climático sobre los ecosistemas de montaña, y particularmente sobre los páramos, pueden ser complejos y dependerán no solo de la respuesta de las comunidades a los cambios en el clima, sino también de la matriz de disturbios que ya ocurre en un sitio. En nuestro estudio, por ejemplo, los mayores cambios en la mesofauna se dieron en las parcelas que fueron sujetas a los dos tratamientos juntos (quema y calentamiento). Desde esta perspectiva sugerimos que el análisis de los posibles efectos del cambio climático y el manejo de los ecosistemas de páramo debe necesariamente partir de una mejor comprensión de los impactos que ya ocurren en este ecosistema y de cómo el cambio del clima podría incidir sobre esas alteraciones.

Nuestros resultados sobre los patrones de descomposición de hojarasca y la temperatura apoyan la idea de que la naturaleza e intensidad de los efectos del cambio climático dependerá de una compleja red de interacciones con otras variables. Así, mientras que en un ecosistema frío como el páramo podríamos esperar que un aumento de temperatura determine una mayor descomposición de hojarasca, nuestros resultados mostraron el patrón opuesto, quizás como resultado de una disminución, al menos temporal, en el

contenido de humedad del suelo. Este tipo de interacciones no ha sido aún explorado para ecosistemas andinos y merece futuros estudios.

Los disturbios antropogénicos crean relaciones complejas en el medio ambiente, sobre todo en un ecosistema con condiciones tan extremas como son los ecosistemas de altura. La quema es solo uno de muchos disturbios a los que se enfrentan estos lugares, y estudios previos ya han mostrado que la interacción entre diferentes condiciones del ecosistema altera su posible respuesta al cambio climático. Por ejemplo, en un estudio sobre la composición de la vegetación frente a condiciones de cambio climático y aumento de nutrientes se observó cómo los dos efectos alteraron la jerarquía de dominancia en las plantas (Klanderud & Totland 2005). Estas interrelaciones son estrechas y por lo tanto pueden alterar el suelo, la vegetación, y otros componentes de la estructura y funcionamiento del ecosistema.

## LITERATURA

1. Aerts, R. (2006). The Freezer defrosting: global warming and litter decomposition rates in cold biomes. *Ecology* , 94: 713-724.
2. Aguirre, L. (2000). *Impacto de la Quema Controlada en los Pastizales de los Páramos de la Sierra Central de Perú*. Lima: II Conferencia Electrónica sobre Usos Sostenibles y Conservación del Ecosistema Páramo en los Andes. "Los páramos como Fuente de Agua: mitos, realidades, retos y acciones".
3. Buytaert, W., Cuesta-Camacho, F., & Torbón, C. (2011). Potential Impacts of climate change on the Environmental services of humid tropical alpine regions. *Global Ecology and Biogeography* , 20: 19-33.
4. Coello, F. (1994). *Plan de Manejo de la Reserva Ecológica El Ángel, Porvincia del Carchi*. Quito: Ministerio de Bienestar Social , Programa Nacional de Desarrollo Rural, Convenio INEFAN-ICCA.
5. Connell, J. H. (1978). Diversity in Tropical Rain Forests and Coral Reefs. *Science* , 1302-1310.
6. Giles, M. (2000). *Temperature Enhancement Experiments*.
7. Hofstede, R. G. (1995). The effects of grazing and burning on soil and plant nutrient concentrations in Colombian páramo grasslands. *Pant and Soil* , 173:111-132.
8. Hofstede, R., Segarra, P., & Mena Vásconez, P. (2003). *Los Páramos del Mundo*. Quito: EcoCiencia.

9. IPCC. (2013). Intergovernmental Panel on Climate Change Report 2013. *Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility - Final* , 33-66.
10. Kapelle, M., Vuuren, M. M., & Baas, P. (1999). Effects of Climate change on Biodiversity: a review and identification of key research issues. *Biodiversity and Conservation* , 8: 1383-1397.
11. Karyanto, A., Cahyo, R., Susilo, F.-X., Franklin, E., & de Morais, J. W. (2012). Collemola, acari y otra mesofauna del suelo: el método Berlese. En F. M. Moreira, J. Huising, & D. Bignell, *Manual de Biología de Suelos Tropicales: muestreo y caracterización de la biodiversidad bajo el suelo* (págs. 152-153). México D.F.: Secretaría Nacional de Medio Ambiente; Instituto Nacional de Ecología.
12. Klanderud, K., & Totland, O. (2005). Simulated climate change altered dominance hierarchies and diversity of an alpine biodiversity Hotspot. *Ecology* , 86:8 2047 - 2054.
13. Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2008). *Plan de Manejo Reserva Ecológica "El Ángel"*. Quito: Ministerio Ambiente e Ecuador.
14. Pickett, B. (2001). Comparison of terrestrial invertebrate communities in páramo areas with different recent fire histories. En P. Ramsay, *The Ecology of Volcán Chiles: High Altitude Ecosystems on the Ecuador-Colombia Border* (págs. 153-158). Plymouth: Pebble & Shell.
15. Robinson, C., Wookey, P., Parsons, A., Potter, J., Lee, J., & Callaghan, T. (1995). Responses of Plant Litter decomposition and nitrogen mineralisation to simulated

environmental change in a high arctic polar semi-desert and subarctic dwarf shrub heath. *Oikos* , 74: 503-512.

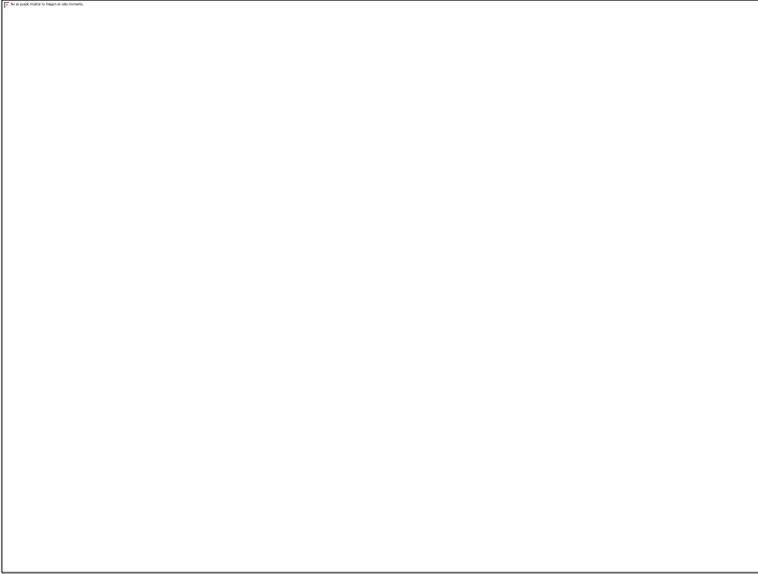
**16.** Shaver, G., Giblin, A., Nadelhoffer, K., & Laundre, J. (1995). Response of Arctic Tundra to Experimental and Observed Changes in Climate. *Ecological Society of America* , 76:3 694-711.

**17.** Walker, M., Wahren, H., Hollister, R., Henry, G., Ahlquist, L., Alatalo, J., y otros. (2006). Plant Community responses to experimental warming across the tundra biome. *PNAS* , 103:5; 1342-1346.

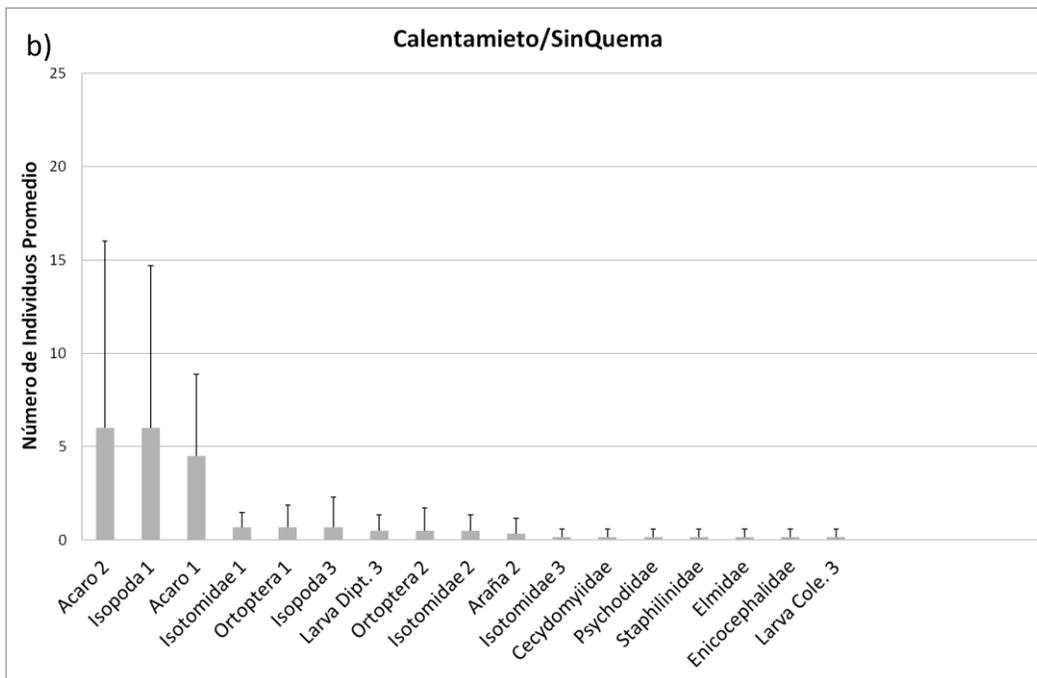
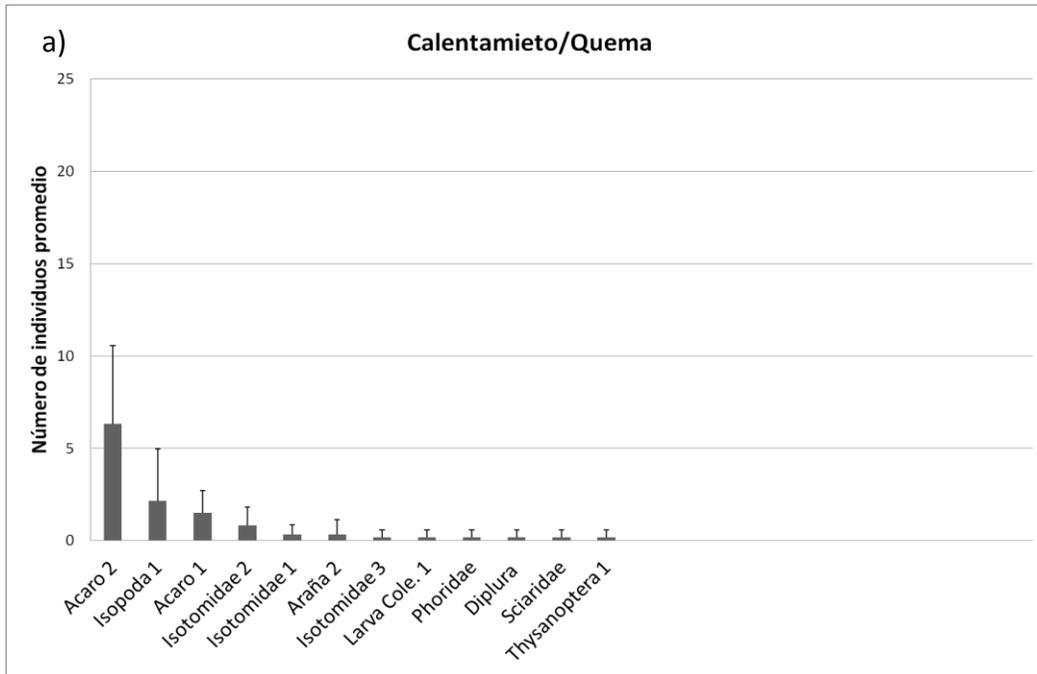
## TABLAS Y FIGURAS

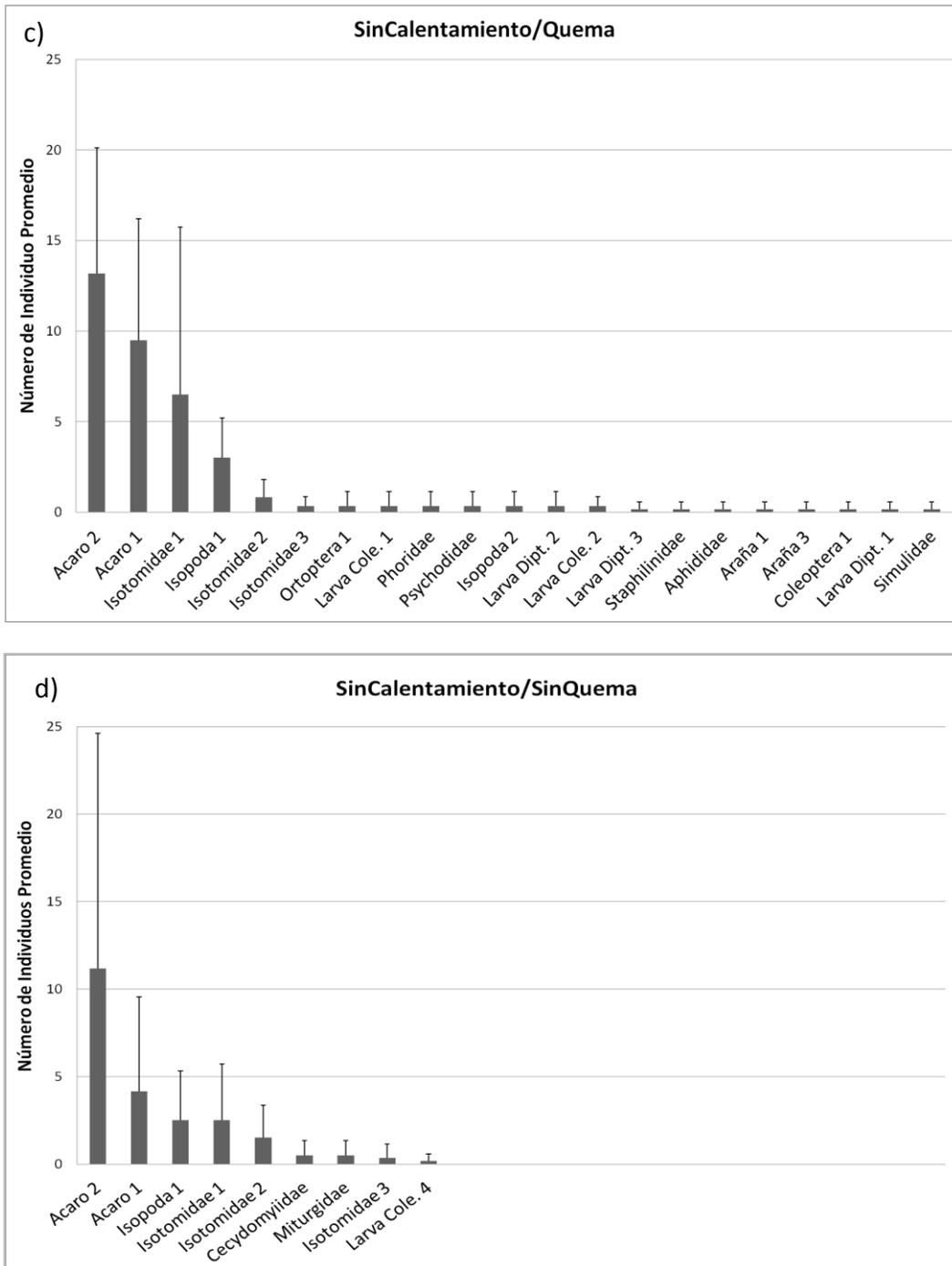
**Tabla 1.** Resultados del conteo total de especies y de individuos por tratamientos y por profundidades.

Tratamiento		PROFUNDIDAD DEL SUELO			
		0-4		4-8	
Cámara	Quema	N° spp	N° indiv.	N° spp	N° indiv.
Control	Control	9	140	7	9
Cámara	Control	17	129	12	14
Control	Quema	21	222	4	7
Cámara	Quema	12	75	8	9
<b>Total</b>		33	566	21	39

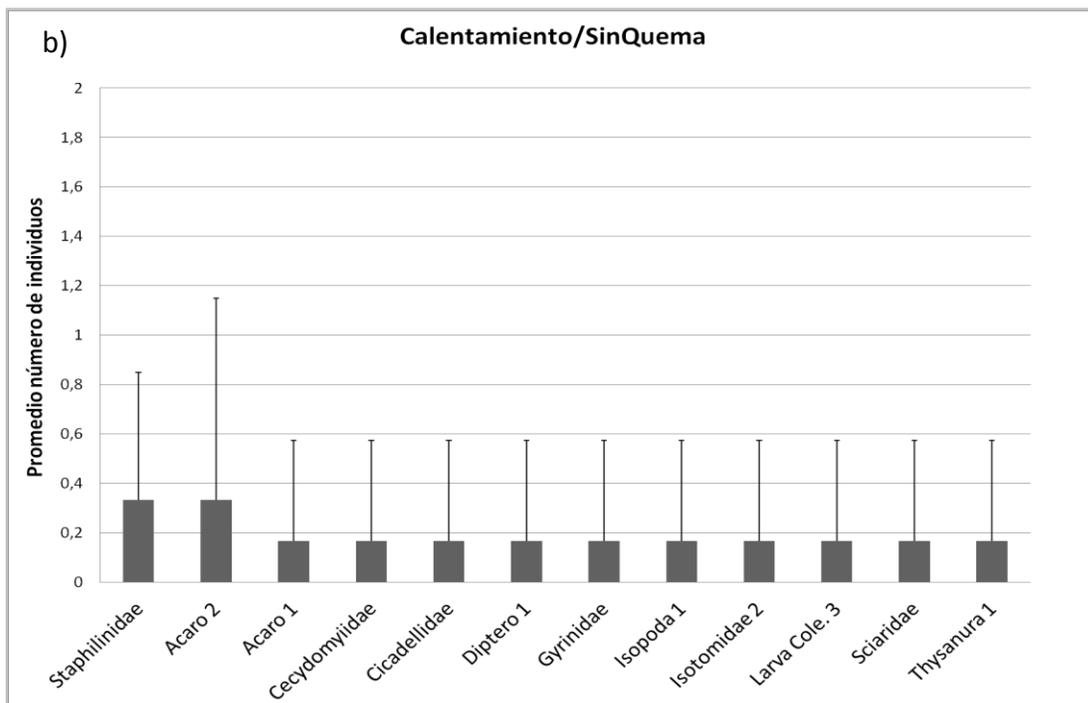
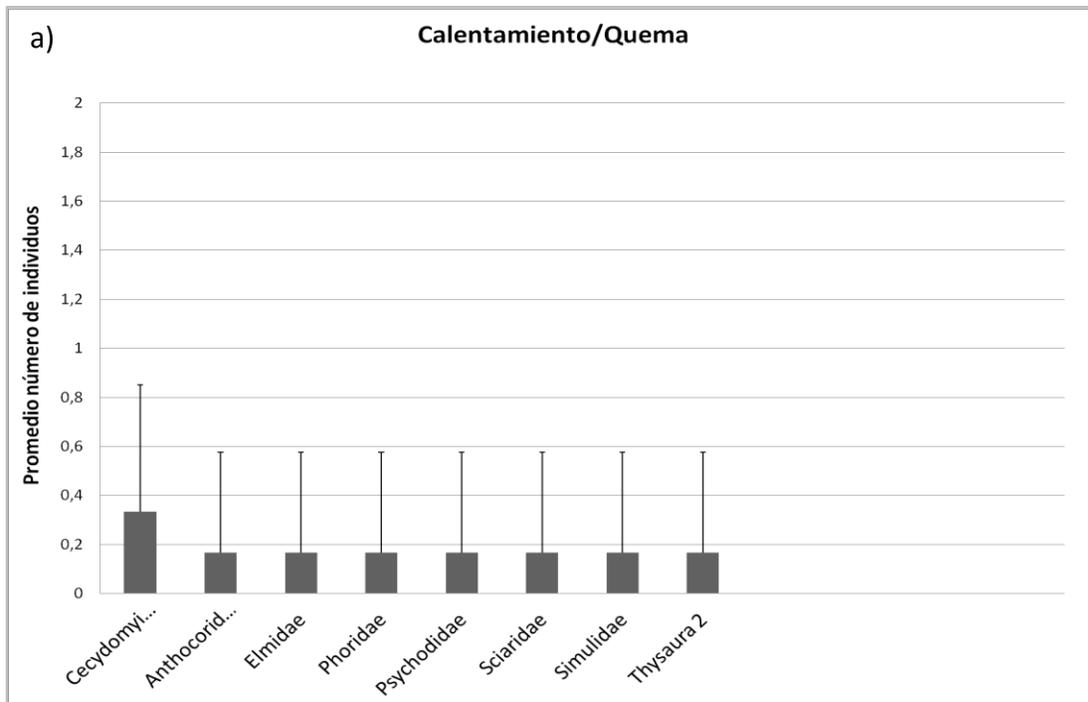


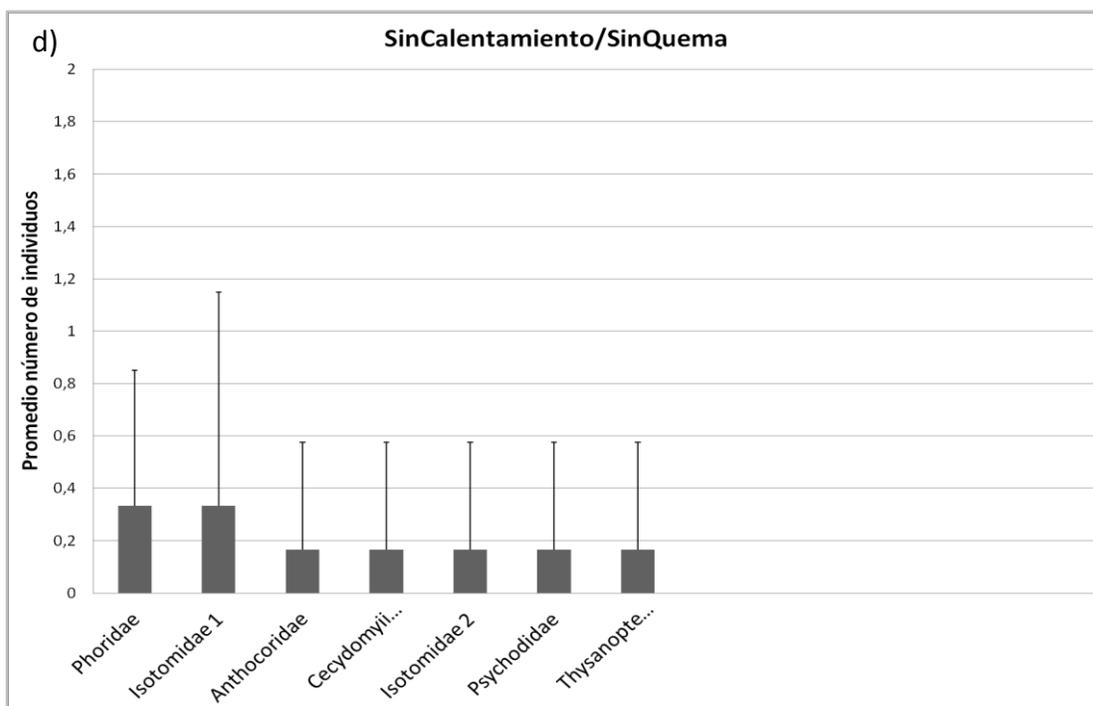
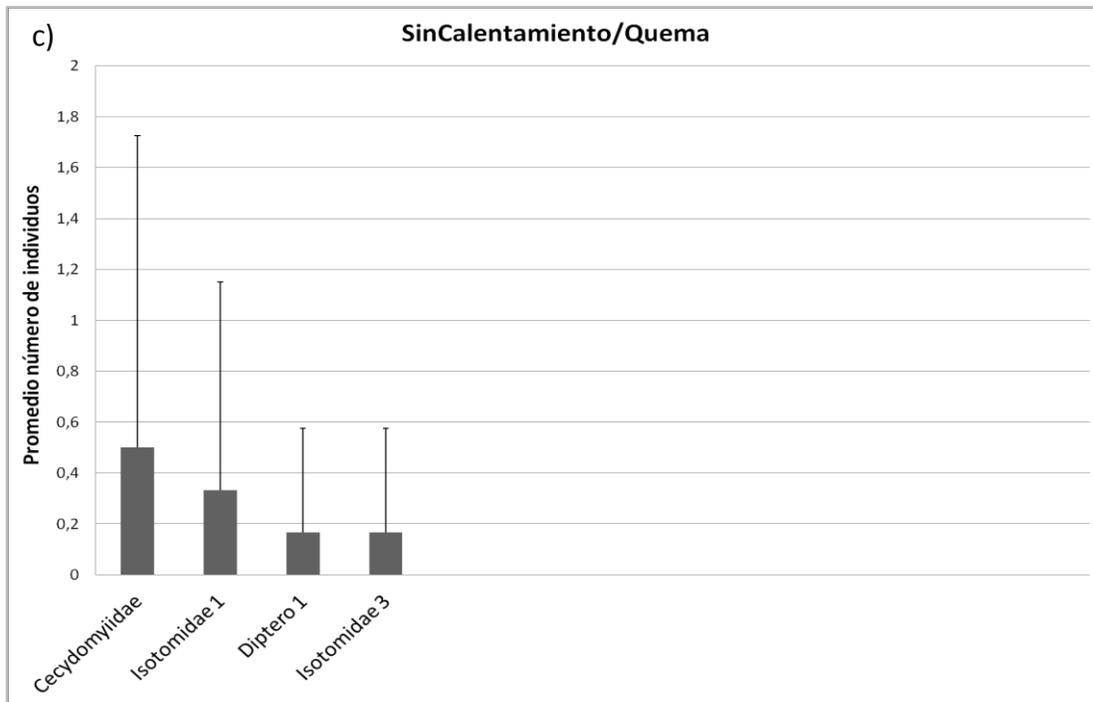
**Figura 1.** Foto de una de las cámaras. Se observa la forma y cómo las paredes están inclinadas hacia adentro.



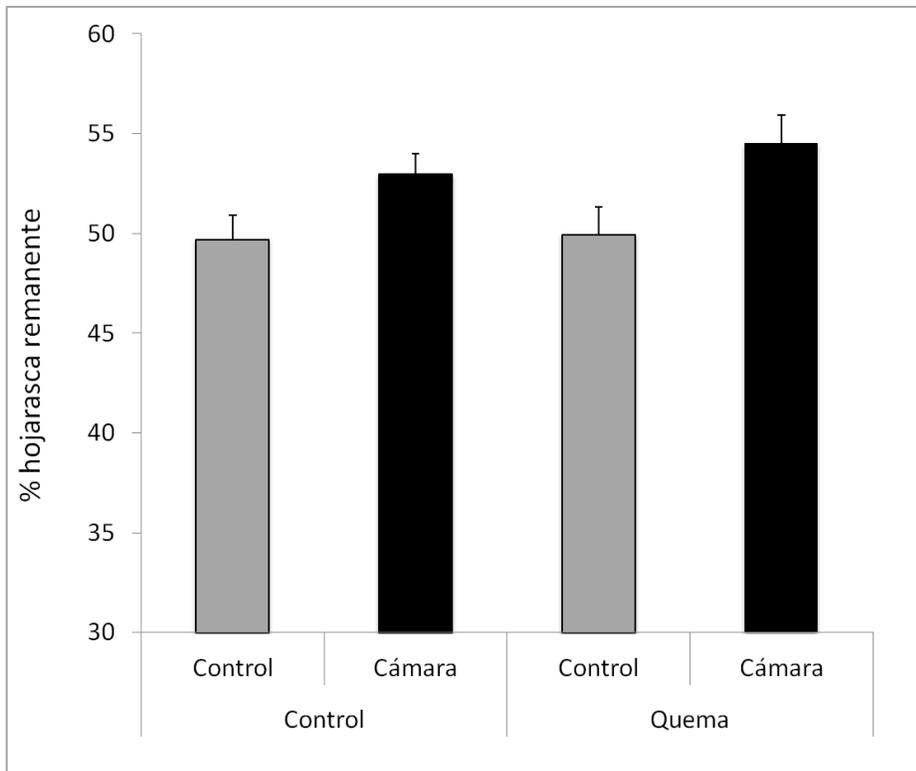


**Figura 2.** Este gráfico muestra el número de especies (media  $\pm$  DE) encontradas en cada tratamiento en la profundidad de 0-4 cm. Cada uno de los 4 tratamientos tiene 6 réplicas- a: tratamiento/quema; b: calentamiento/sin quema; c: sin calentamiento/con quema, d: sin calentamiento/sin quema.

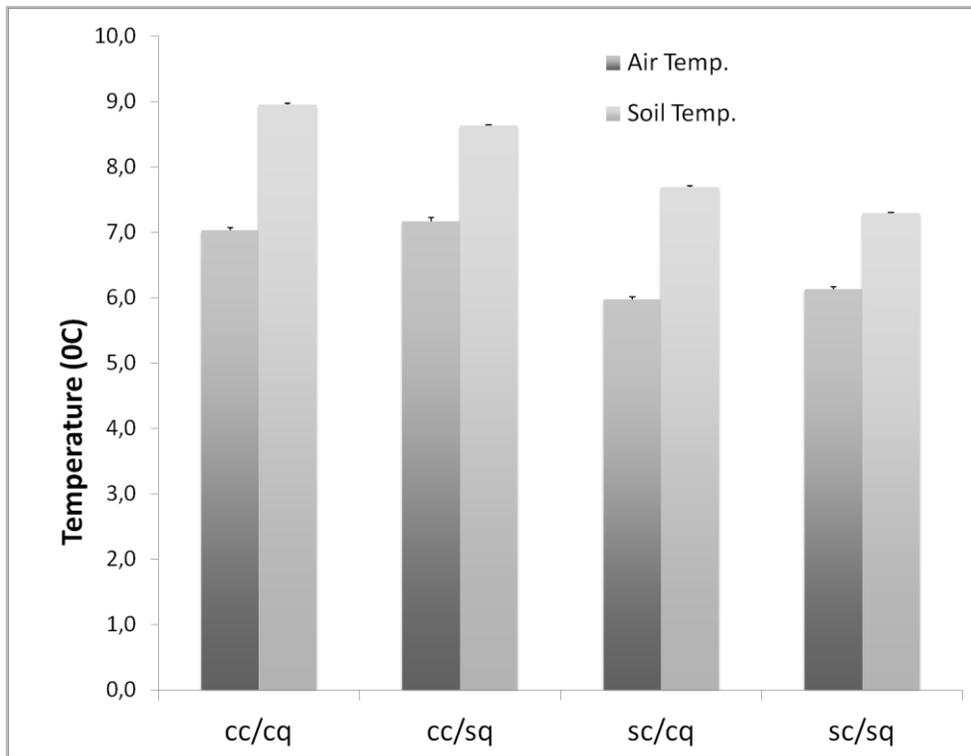




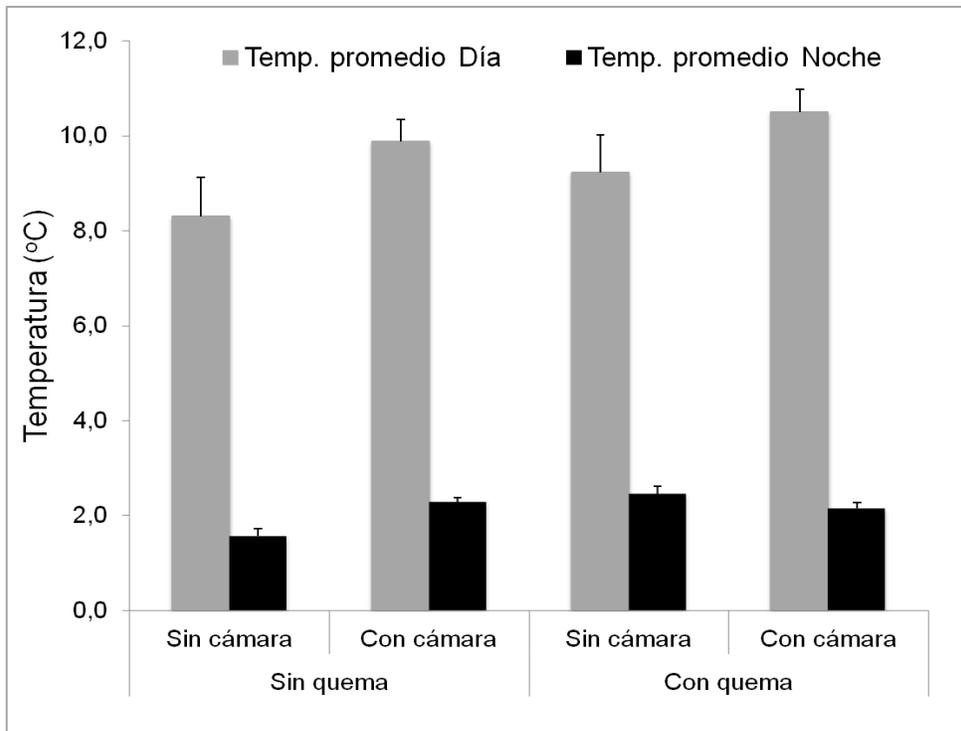
**Figura 3.** Número de especies (media  $\pm$  DE) encontradas en cada tratamiento en la profundidad de 4-8 cm. Cada tratamiento tiene 6 réplicas. a: tratamiento+quema; b: calentamiento/sin quema; c: sin calentamiento/con quema, d: sin calentamiento/sin quema.



**Figura 4.** Porcentaje de la hojarasca remanente de acuerdo con el tratamiento de cada parcela.



**Figura 5.** Comparación de la temperatura en °C entre el suelo y el aire y entre los diferentes tratamientos.



**Figura 6.** Comparación del cambio de temperatura en °C del aire entre el día y la noche, y entre los cuatro diferentes tratamientos.