

Universidad Nacional de General Sarmiento

Doctorado en Ciencia y Tecnología



Indicadores de sustentabilidad del suelo basados en la
estructura y funcionamiento de la fauna edáfica.

Autor: Rosana V. Sandler

Director: Dr. Carlos E. Coviella

Codirectores: Ing. Liliana B. Falco, Dr. Leonardo Saravia

Consejeros de Estudio

Dr. Fernando Momo

Dr. Javier Montserrat

Dra. Anita Zalts.

A

Alba y Jonathan

Inés y Oscar

Leonardo y Natalia

Monika y Daniel

Angélica, Diego, Allegra y Luisana

Agradecimientos

A Inés y Oscar, que sin el apoyo constante de ellos toda mi vida y en particular este trabajo hubiese sido imposible.

A Carlos y Liliana, que no me dejaron bajar los brazos y me apuntalaron en todo momento, gracias a lo cual llegamos a este hermoso final.

A Leo que fue parte fundamental en hacerme entender (cosa nada fácil) la parte estadística de todo el trabajo.

A toda la gente linda del laboratorio de Ecología (que están o estuvieron): Andrés, Aníbal, Ceci, Cesar, Claudia, Conni, Fernando, Gaby, Lau M., Lau R., Leo M., Leo L., Loreta, Lu, Ma. Andrea, Marina, Mariu, Monica, Nadia, Nico, Patricia, Ricardo, Vivina.

A Romina De Luca, Edgardo Ferrari y Pablo Peretto por brindarme tan amablemente sus campos para poder realizar los muestreos.

Y a todos los que de una u otra manera formaron parte de este largo pero gratificante camino.

De todo corazón muchas gracias!!!

RESUMEN

El suelo es un sistema heterogéneo que posee una gran complejidad estructural y funcional, debido a la gran diversidad de sus componentes tanto abióticos como bióticos, así como de los procesos que tienen lugar en él. La biota edáfica juega un rol preponderante en muchos de estos procesos, como por ejemplo, la mineralización de nutrientes, la descomposición y reciclado de la materia orgánica o la regulación de las densidades poblacionales de la microflora.

Debido a que esta biota es altamente sensible a perturbaciones del suelo, la gran intensificación de la producción agrícola ganadera que viene teniendo lugar desde mediados del Siglo XX, ha producido modificaciones en las comunidades edáficas, y por consiguiente en los procesos en los cuales ellos participan.

En función de esta intensificación y sus efectos, es que se plantea como objetivo general en esta tesis, evaluar y cuantificar efectos directos e indirectos de diferentes grados de intensidad de uso del suelo sobre la estructura (abundancia, riqueza y diversidad) del ecosistema edáfico y con ello detectar indicadores biológicos de calidad del suelo. Para poder lograr este objetivo se realizaron muestreos estacionales durante dos años en campos con tres sistemas de uso diferente: 1) Pastizales Naturalizados (PN), los cuales hace más de 50 años que no sufren impacto antrópico, 2) Sistema Mixto (SM), campos dedicados a la ganadería que entraron a un ciclo agrícola 2 años antes de comenzar los muestreos, y 3) Sistema Agrícola (SA), campos con más de 40 años de agricultura intensiva continua. En todos ellos se midieron las siguientes variables físico-químicas: densidad aparente, resistencia mecánica, humedad, conductividad eléctrica, pH, contenido de materia orgánica, contenido de Fósforo (P), Nitrógeno total (N) y de los cationes Sodio (Na), Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y Potasio (K). Como variables microbiológicas se midieron: Respiración edáfica y Actividad de bacterias libres fijadoras de N.

En los mismos puntos y fechas se tomaron muestras para el análisis de las comunidades de colémbolos (Hexapoda, Collembola), ácaros (Chelicerata, Acari) y lombrices (Annelida, Oligochaeta) (abundancia, riqueza y diversidad a diferentes niveles taxonómicos).

Los análisis que se realizaron apuntaron a determinar las variables ambientales que más aportan a la variabilidad de los sitios, y a estudiar el comportamiento de las comunidades de la biota edáfica bajo el impacto de diferentes prácticas agrícolas.

Los resultados obtenidos muestran que las prácticas utilizadas en los sistemas estudiados produjeron efectos significativos en gran parte de las variables analizadas y gracias a esto se lograron identificar indicadores biológicos de determinadas variables ambientales y de diferentes sistemas de uso.

Las variables microbiológicas denotaron el impacto mostrando diferencias según el uso del suelo. Así, la respiración resultó $PN > SM > SA$ y la actividad de la nitrogenasa resultó mayor en PN que en el sistema agrícola. Estos resultados son significativos en el marco del uso sustentable del recurso suelo, pues apoyan la hipótesis de que monitorear cambios en el funcionamiento de la biota del suelo permiten anticipar un posible proceso de degradación de manera temprana.

En las comunidades de colémbolos y ácaros, los resultados mostraron una respuesta diferencial en sus abundancias, riqueza y diversidad. La gran diversidad taxonómica que presentan estos dos grupos, permite obtener resultados relevantes a diferentes niveles taxonómicos. Los resultados muestran comportamientos claramente no lineales de las Familias de colémbolos como Hypogastruridae, Isotomidae, Entomobryidae y Katiannidae y la superfamilia de ácaros Parasitoidea, con respecto al hábitat definido por las variables ambientales en su conjunto, así como también la superfamilia de ácaros Veigaidoidea que resultó ser indicadora de variables ambientales como K y P muy importantes desde un punto de vista agronómico.

La comunidad de las lombrices de tierra varió entre los diferentes sistemas estudiados. En el PN la especie dominante fue *Microscolex dubius*, mientras que en el SM la especie *Eukerria stagnalis* fue la dominante, representando el 67% de todos los individuos colectados. En el SA las especies más comunes fueron las exóticas *Aporrectodea caliginosa*, *A. rosea*, y *A. trapezoides*, representando el 95 % de todos los individuos encontrados. Este estudio nos permitió identificar claramente especies de lombrices que pueden ser utilizadas como indicadoras de diferentes sistemas de uso así como también de algunas variables ambientales.

Los resultados de esta tesis aportan al estudio de las comunidades de la biota edáfica y a su uso como posible indicadora de síntomas tempranos de deterioro de suelos. En este sentido, resultan de suma importancia ya que brindan nuevos enfoques y herramientas para el uso de la biología del suelo con vistas a evaluar el uso sustentable de este recurso, área que está en constante desarrollo y crecimiento.

INDICE

Capítulo I: Marco Teórico

Introducción

El suelo y su uso sustentable.....	17
La agricultura y su intensificación.....	19
Estudio de caso: Pampa Argentina.....	21
Servicios ecosistémicos y la biota edáfica.....	25
Importancia de los grupos faunísticos.....	29
Índices e indicadores.....	31

Objetivo

Objetivo General.....	37
Objetivos Específicos.....	38
Hipótesis de trabajo	38
Bibliografía.....	39

Capítulo II: Área de estudio y diseño experimental

Área de estudio

Generalidades.....	50
Sitios de muestreo.....	52
Diseño experimental.....	57
Bibliografía.....	61

Capítulo III: Análisis físico-químico de los suelos

Introducción.....	64
-------------------	----

Objetivos.....	66
Diseño de muestreo	66
Variables físico-químicas medidas	
Variables físicas.....	67
Densidad aparente (Dap).....	67
Resistencia mecánica.....	69
Variables químicas.....	70
Humedad del suelo	71
Conductividad eléctrica (CE).....	72
pH.....	73
Materia orgánica (MO).....	76
Nutrientes.....	79
Nitrógeno total (N).....	79
Fósforo (P).....	81
Potasio (K) y Sodio (Na).....	82
Calcio (Ca) y Magnesio (Mg).....	83
Caracterización de los sistemas de uso de suelo.....	85
Análisis estadísticos.....	85
Resultados y discusión.....	85
Selección del set mínimo de datos.....	88
Conclusiones	
Caracterización de los sistemas de uso de suelo.....	93
Selección del set mínimo de datos.....	93
Bibliografía.....	95

Capítulo IV: Análisis de las comunidades edáficas

Introducción

Importancia de la biota edáfica	99
Clasificación.....	102
Los grupos más representativos de la biota edáfica	
Microflora y Microfauna.....	105
Mesofauna.....	106
Los colémbolos.....	106
Los ácaros.....	108
Macrofauna - Lombrices.....	109
Bioindicadores.....	111
Objetivos.....	114
Diseño de muestreo.....	114
Método de análisis de la actividad microbiológica.....	115
Métodos de extracción de la edafofauna	
Mesofauna.....	116
Embudo de Berlese – Tullgren	117
Técnica de flotación.....	118
Macrofauna - Muestreo de lombrices.....	120
Análisis estadísticos.....	121
Resultados y discusión	
Descripción de la actividad microbiológica y comparación entre los ambientes.....	121

Descripción de las comunidades y comparación entre los ambientes.....	125
Respuesta de la comunidad de colémbolos a cambios en el ambiente edáfico.....	125
Índice de grado de cambio de la diversidad de sistemas ecológicos.....	131
Discusión.....	134
Respuesta de la comunidad de ácaros a cambios en el ambiente edáfico.....	138
Índice de grado de cambio de la diversidad de sistemas ecológicos.....	152
Discusión.....	154
Respuesta de la comunidad de lombrices a cambios en el ambiente edáfico.....	159
Comparación de las abundancias de las sp. de lombrices entre los sistemas.....	165
Discusión.....	167
Bibliografía.....	170

Capítulo V: Indicadores biológicos

Buscando indicadores.....	182
Interpretación de los resultados obtenidos.....	183
Entonces: ¿Qué es lo que está sucediendo con los ambientes seleccionados para el estudio?.....	193
Algunos de los grupos encontrados ¿son indicadores de algunos de los	

sistemas?: Cálculo de Indval.....	195
Bibliografía.....	202
Capítulo VI: Conclusiones	
Conclusiones.....	205
Bibliografía.....	214
ANEXO I: Métodos de determinación de las variables físico – químicas.....	215
ANEXO II: Superficies de respuesta de todos los grupos taxonómicos contrados.....	220
ANEXO III: Publicaciones y presentaciones a congresos	230

LISTADO DE FIGURAS

Capítulo I

Fig. 1.1: Argentina: Evolución de la superficie cultivada (como % de total de cada cultivo)

Fig. 1.2: Argentina: Evolución de la superficie del cultivo de soja.

Fig. 1.3: La soja gana terreno a expensas de la ganadería.

Fig. 1.4: Clasificación de tipos de Servicios Ecosistémicos.

Capítulo II

Fig. 2.1: Mapa de la ubicación de la Llanura Pampeana.

Fig. 2.2: Localización geográfica de los sitios de muestreo.

Fig. 2.3. Ubicación de los nueve lotes muestreados.

Fig. 2.4: Promedio de lluvias mensuales durante los años 2009 y 2010.

Fig. 2.5: Esquema del diseño de muestreo.

Capítulo III

Fig. 3.1: pH óptimos para algunos organismos y para la asimilación de ciertos nutrientes.

Fig. 3.2: Análisis discriminante mostrando la separación de los ambientes en base a las variables físico-químicas.

Capítulo IV

Fig. 4.1: Red trófica del suelo.

Fig. 4.2: Clasificación de la biota edáfica según se presencia en el suelo de su ciclo de vida.

Fig. 4.3: Clasificación de la biota edáfica según su ancho corporal.

Fig. 4.4: Método: Embudo de Berlese - Tullgren.

Fig. 4.5: Técnica de Flotación.

Fig. 4.6: Respiración edáfica de un suelo argiudol sometido a tres diferentes intensidades de uso.

Fig. 4.7: Actividad nitrogenasa de un suelo argiudol sometido a tres diferentes intensidades de uso medida a través de la actividad reductora de acetileno (ARA).

- Fig. 4.8: Comparación de las abundancias del orden Collembola entre los ambientes.
- Fig. 4.9: Comparación de las abundancias de la familia Hypogastruridae entre los sistemas.
- Fig. 4.10: Comparación de las abundancias de la familia Onychiuridae entre los sistemas.
- Fig. 4.11: Comparación de las abundancias de la familia Isotomidae entre los sistemas.
- Fig. 4.12: Comparación de las abundancias de la familia Entomobryidae entre los sistemas.
- Fig. 4.13: Comparación de las abundancias de la familia Katiannidae entre los sistemas.
- Fig. 4.14: Comparación de las abundancias de ácaros entre los ambientes.
- Fig. 4.15: Comparación de las abundancias de Oribatida entre los tres sistemas.
- Fig. 4.16: Comparación de las abundancias de Prostigmata entre los sistemas.
- Fig. 4.17: Comparación de las abundancias de Rhodacaroidea entre los sistemas.
- Fig. 4.18: Comparación de las abundancias de Oppioidea entre los sistemas.
- Fig. 4.19: Comparación de las abundancias de Oripodoidea entre los sistemas.
- Fig. 4.20: Comparación de las abundancias de Bdelloidea entre los sistemas.
- Fig. 4.21: Comparación de las abundancias de Lohmannioidea entre los sistemas.
- Fig. 4.22: Abundancia relativa de las especies de lombrices en el Pastizal Naturalizado.
- Fig. 4.23: Abundancia relativa de las especies de lombrices en el Sistema Mixto.
- Fig. 4.24: Abundancia relativa de las especies de lombrices en el Sistema Agrícola.
- Fig. 4.25: Comparación de las abundancias de *Aporrectodea caliginosa* entre los ambientes.
- Fig. 4.26: Comparación de las abundancias de *Microsclex dubius* entre los ambientes.

Capítulo V

- Fig. 5.1: Superficies de respuesta de la variable microbiológica ARA.
- Fig. 5.2: Superficies de respuesta de las familias de colémbolos.
- Fig. 5.3: Superficies de respuesta de la supefamilia de ácaros Oripodoidea.
- Fig. 5.4: Superficies de respuesta de la supefamilia de ácaros Parasitoidea.
- Fig. 5.5: Superficies de respuesta de la supefamilia de ácaros Veigaidoidea.
- Fig. 5.6: Superficies de respuesta de la especie de lombriz *Aporrectodea caliginosa*.
- Fig. 5.7: Superficies de respuesta de la especie de lombriz *Eukerria stagnalis*.

Fig. 5.8: Superficies de respuesta de las especies de lombrices a) *Octalacion cyaneum* y b) *Microscolex dubius*.

LISTADO DE TABLAS

Capítulo II

Tabla 2.1: Ubicación de los nueve lotes muestreados.

Tabla 2.2: Descripción física y química de los perfiles típicos de estas series.

Tabla 2.3: Diseño experimental.

Tabla 2.4: Variables analizadas y sus métodos.

Capítulo III

Tabla 3.1: Rangos de densidad aparente.

Tabla 3.2: Rangos de resistencia mecánica.

Tabla 3.3: Rangos de humedad.

Tabla 3.4: Rangos de conductividad eléctrica.

Tabla 3.5: Rangos de pH.

Tabla 3.6: Rangos de materia orgánica.

Tabla 3.7: Composición cuantitativa de la solución del suelo, con datos expresados en milimoles/litro.

Tabla 3.8: Rangos de nitrógeno.

Tabla 3.9: Rangos de fósforo.

Tabla 3.10: Rangos de potasio.

Tabla 3.11: Rangos de sodio.

Tabla 3.12: Rangos de calcio.

Tabla 3.13: Rangos de magnesio.

Tabla 3.14: Variables físico químicas de muestras de suelo bajo tres intensidades de uso.

Tabla 3.15: Matriz de correlación de los autovalores.

Tabla 3.16: Correlaciones variable – factor (Loading factor).

Tabla 3.17: Análisis de correlación entre las variables físico – químicas.

Capítulo IV

Tabla 4.1: Influencia de la biota del suelo en los procesos ecosistémicos.

Tabla 4.2: Familias de colémbolos determinadas en el estudio.

Tabla 4.3: Abundancias de cada familia de colémbolos en los ambientes estudiados (individuos totales).

Tabla 4.4: Valores de riqueza, diversidad de Shannon y Equitatividad de colémbolos en los tres sistemas agrícolas estudiados.

Tabla 4.5a: Índice del grado de cambio de la diversidad de colémbolos entre el Pastizal Naturalizado y el Sistema Mixto.

Tabla 4.5b: Índice del grado de cambio de la diversidad de colémbolos entre el Sistema Agrícola y el Sistema Mixto.

Tabla 4.5c: Índice del grado de cambio de la diversidad de colémbolos entre el Pastizal Naturalizado y el Sistema Agrícola.

Tabla 4.6: Superfamilias de ácaros determinadas en el estudio

Tabla 4.7: Abundancias de cada superfamilia de ácaros en los ambientes estudiados (individuos totales).

Tabla 4.8: Valores de Riqueza, Diversidad de Shannon y Equitatividad de superfamilias de ácaros en los tres sistemas agrícolas estudiados.

Tabla 4.9a: Índice del grado de cambio de la diversidad entre el Pastizal Naturalizado y el Sistema Mixto.

Tabla 4.9b: Índice del grado de cambio de la diversidad entre el Sistema Agrícola y el Sistema Mixto.

Tabla 4.9c: Índice del grado de cambio de la diversidad entre el Pastizal Naturalizado y el Sistema Agrícola.

Tabla 4.10: Especies de lombrices determinadas en el estudio.

Tabla 4.11: Abundancias de cada especie de lombriz en los ambientes estudiados (individuos totales).

Tabla 4.12: Valores de Riqueza, Diversidad de Shannon y Equitatividad de especies de lombrices en los tres sistemas agrícolas estudiados.

Capítulo V

Tabla 5.1: Comparación de las variables físico – químicas entre un suelo esperado y uno observado.

Tabla 5.2: Valores de los componentes A y B del cálculo de Inval del Pastizal Naturalizado.

Tabla 5.3: Valores de los componentes A y B del cálculo de Inval del Sistema Mixto.

Tabla 5.4: Valores de los componentes A y B del cálculo de Inval del Sistema Agrícola.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

INTRODUCCIÓN

El suelo y uso sustentable

El suelo es un sistema heterogéneo que posee una gran complejidad estructural y funcional debido a la gran diversidad de sus componentes (abióticos y bióticos), y a los procesos que en él tienen lugar (Labrador, J., 2008). Como todo sistema, evoluciona en el tiempo condicionado por factores ambientales que están presentes en un escenario concreto y en general, en los suelos de cultivo, mantiene una dinámica determinada por un sistema de uso impuesto por condiciones socioeconómico y culturales (Labrador, J., 2008). Poder mantener un uso sustentable del suelo es un objetivo fundamental en nuestro sistema de producción de alimentos.

Un concepto holístico de sustentabilidad se basa en el mantenimiento de los ecosistemas, y de sus componentes y procesos en una condición tal que les permita continuar proveyendo todos los servicios ecosistémicos que son capaces de proveer (Andreasen et al., 2001).

Los sistemas de producción sustentables deben reunir los siguientes requisitos: 1) conservar los recursos; 2) preservar el medio ambiente; 3) responder a los requerimientos sociales; y 4) ser económicamente competitivos y rentables (Martellotto et al., 2001). La distinta índole de los requisitos mencionados ha dado lugar también a que se identifiquen tres ejes de la sustentabilidad: la viabilidad ecológica, la viabilidad social y la viabilidad económica (Satorre, E., 2003).

Desde un punto de vista agronómico se puede afirmar que la agricultura sustentable se basa en sistemas de producción cuya principal característica es la aptitud de mantener su productividad y ser útiles a la sociedad indefinidamente (Satorre, E., 2003).

El sistema edáfico es inherentemente complejo, compuesto por muchas interacciones de componentes físicos, químicos y biológicos. Predecir el comportamiento de sistemas complejos es difícil, por eso la toma de decisiones políticas y de manejo requiere información del estado, condición y tendencias del ecosistema (Andreasen et al., 2001).

La *calidad del suelo* es entendida como la capacidad del suelo de realizar las funciones ecosistémicas, que permitan sostener la productividad de plantas y animales, sin que esto resulte en la degradación del suelo o en un daño ambiental; mantener y mejorar la calidad del agua y el aire, y promover la salud de animales, plantas y humanos (Doran y Parkin, 1994). Esta definición operativa implica que un suelo será de mayor calidad si es capaz de mantener la provisión de servicios ecosistémicos de manera de satisfacer las necesidades de las generaciones actuales, sin comprometer su uso para las generaciones futuras, de acuerdo con la definición del Reporte Brundtland (WCED, 1987).

En los suelos utilizados en la producción agrícola ganadera, la calidad del suelo está dada por ciertas características físicas, químicas y biológicas que hacen de él un sistema productivo. Las características principales que hacen que un suelo productivo tenga estándares de calidad altos son: buenos niveles de materia orgánica, de nutrientes, niveles óptimos de humedad, niveles de resistencia mecánica y densidad aparente que permitan un buen desarrollo radicular y buena circulación de aire y agua así como mantener una comunidad de organismos propicia para que realicen los procesos necesarios para un suelo productivo. Suelos de buena calidad son aquellos que permiten maximizar la producción y minimizar la erosión (Pla Sentís, I., 2013).

El suelo agrícola debe contar con nutrientes principales tales como los nitratos, amonio, fósforo, potasio, sulfatos, magnesio, calcio y sodio. Otras propiedades fisicoquímicas que también deben ser tenidos en cuenta al considerar a un suelo como apto para la agricultura son por ejemplo el pH del suelo, su textura y su conductividad eléctrica.

Algunos estudios consideran indicadores de la calidad del suelo cualquiera de las propiedades físicas, químicas y biológicas (SQI, 1996); otros establecen la necesidad de integrar todas las propiedades para conocer el estado global del suelo (Doran y Parkin, 1994). En todo caso, resulta complejo evaluar la calidad del suelo, dada la multiplicidad de factores de diferente naturaleza que controlan los procesos biogeoquímicos y su variación en el tiempo, espacio e intensidad.

Mantener una buena calidad del suelo es de suma importancia, desde un punto de vista ambiental para la conservación de los servicios ecosistémicos, y desde un punto de vista agronómico para el crecimiento y desarrollo de los cultivos y la cantidad y calidad de las cosechas, ya que están en relación directa con los nutrientes y las características de los suelos (Sanchez y Sanchez, 1982).

La agricultura y su intensificación

La agricultura se remonta a las épocas en que el hombre comenzó a reemplazar sus hábitos nómadas por sedentarios hace unos 12.000 años (Zizumbo Villarreal et al., 2008). La agricultura es considerada una de las actividades más antiguas, y más importantes que ha practicado el ser humano. Con el correr del tiempo se fueron implementando prácticas, muchas de ellas no intencionadas, que luego fueron repetidas para obtener cosechas con las mismas características. Algunas de estas prácticas fueron: adaptar las cosechas a las condiciones climáticas que se presentan en ciertos períodos del año, lo que luego se denominó rotación de cultivos; el uso de abono natural fue otro mecanismo empleado, el cual proveía de nutrientes a la tierra y la hacía cada vez más fértil; así como también se implementó la diversidad de cultivos, con lo cual se logró satisfacer y variar las necesidades alimenticias.

El aumento del tamaño de la población humana, del consumo per capita y de la complejidad de los centros urbanos, promovieron incrementos constantes de la demanda de alimentos, fibras y energía (Evans, L.T., 1993; Tilman et al., 2001).

Durante la segunda mitad del Siglo XX, la intensificación agrícola reconoce dos procesos paralelos. Por un lado llevó a la incorporación de una cantidad creciente de tierras con destino a actividades agropecuarias, muchas veces en sitios poco apropiados debido al riesgo de erosión, salinización o ambos (Casas, R.R., 1998). Por otro lado, a este aumento de las superficies dedicadas a la agricultura, se sumó una mayor demanda sobre los suelos por intensificación de los propios procesos productivos. Así, la incorporación de variedades más productivas y más recientemente de cultivos transgénicos, se tradujo en un impacto antrópico creciente, debido a la mayor extracción de nutrientes de los suelos (García, F.O., 2001) y a la consecuente necesidad de la agricultura moderna de incorporar maquinaria e insumos, estos últimos bajo la forma de fertilizantes, herbicidas e insecticidas (Casas, R.R., 1988). Como consecuencia de este doble proceso, una significativa disminución en la calidad del suelo ha ocurrido a nivel mundial debido a cambios en sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Casas, R.R., 1998).

Menos de la cuarta parte de las tierras del planeta (unos 3.300 millones de hectáreas), tienen aptitud agrícola en grados variables (Casas, R.R., 2001). De este total solamente unas 450 millones de hectáreas (3%) son aptas para el cultivo en secano sin limitaciones. Del resto de las tierras agrícolas, 900 millones de hectáreas (6%) son moderadamente aptas y 1900 millones de hectáreas (13%) marginalmente aptas.

En los últimos 25 años, se han degradado cerca de 3.500 millones de hectáreas de suelos a nivel mundial, de este total una gran parte corresponde a tierras agrícolas (Bai et al., 2008), situación que influye directamente en los ingresos, productividad, consumo y disponibilidad de alimentos (Sherr, S.J., 1999) y atenta contra su uso sustentable.

Se estima que alrededor de un 30% de las tierras arables están afectadas por diversos procesos de degradación con un incremento anual de 5 a 7 millones de hectáreas (Casas, R.R., 2001). El aumento de las tierras degradadas y de la población mundial, determina que mientras que en el año 1990 existían 0,25 hectárea de tierra

arable por habitante, en el 2000 esa superficie disminuyó a 0,23 hectárea por habitante (Casas, R.R., 2001).

Actualmente la modalidad de producción agrícola a gran escala basada en el uso intensivo de agroquímicos se encuentra sujeta a un gran debate en la comunidad científica internacional respecto de sus reales beneficios y riesgos ambientales y su sustentabilidad en el mediano y largo plazo (Plucknett, D.L., 1993; Waggoner, P.E., 1995; Ewers et al., 2009). Esto ha llevado a un creciente interés por estudiar cómo la agricultura moderna está afectando la capacidad de nuestros recursos naturales de mantener las funciones de los ecosistemas tales como: producción de biomasa (alimentos, fibra y combustible), descomposición de la materia orgánica, reciclaje de los nutrientes, depuración del agua y regulación de la calidad del aire, detoxificación de contaminantes, sumidero de gases invernadero, hábitat para numerosos organismos, reservorio genético y depositario de herencia cultural (Garbisu et al., 2007).

Estudio de caso: Pampa Argentina

La Pampa Argentina es una amplia planicie con más de 54 millones de hectáreas. La llamada pampa ondulada es la zona más fértil y productiva de la región, donde más del 80% de la tierra está dedicada a la producción de cultivos (Hall et al., 1992; Viglizzo y Roberto, 1998). A su vez, en una gran parte de la región, la ganadería y la agricultura son combinadas en diferentes proporciones en respuesta a limitaciones ambientales específicas (Viglizzo, E.F., 1986). De acuerdo a las lluvias y a la calidad del suelo, la región puede ser dividida en zona húmeda, subhúmeda y semiárida. En pocas palabras, los suelos de la Pampa presentan relativamente pocas limitaciones a la producción de cultivos, y la mayoría son adecuados para la ganadería. Son suelos bajos, bien o relativamente bien drenados, que no ofrecen limitaciones para la extensión de raíces, pero la materia orgánica, así como el contenido de nitrógeno disminuye desde la zona húmeda hacia la árida, mientras que la susceptibilidad a la erosión del viento aumenta en esa misma dirección (Panigatti, J.L., 2010).

Una de las pocas desventajas de estos suelos es su fragilidad tanto a la erosión eólica como la hídrica, las cuales son unas de las mayores limitaciones en la producción de cultivos en la mayor parte de la región (Musto, J.C., 1979, Carta acuerdo FAO – UNSAM, 2014). Otra característica que ha producido variaciones en las producciones es el régimen de lluvia, el cual ha variado a lo largo del tiempo, determinando ciclos de condiciones extremas de sequía e inundaciones (Taboada et al., 2009).

Uno de los principales factores de los suelos de la región pampeana desde comienzos de la etapa de colonización hasta nuestros días, que determina su productividad, es su contenido de materia orgánica y su evolución en el tiempo (Casas, R.R., 2005). Hasta la generalización en el uso de fertilizantes inorgánicos, los sistemas agrícolas convencionales han actuado históricamente consumiendo el stock de materia orgánica del suelo. Los sistemas mixtos de utilización de la tierra que se extendieron en las décadas del 50 y del 60 lograron recuperar parte de la materia orgánica perdida, hasta que el ciclo de agriculturización iniciado a principios de los 70, provocó un nuevo descenso de la materia orgánica de los suelos e incremento de los procesos de erosión (Casas, R.R., 2005).

En esta región en particular, la actividad agropecuaria ha crecido y se ha transformado de manera notable en los últimos 30 años (Trigo E., 2016). La superficie de áreas cultivadas ha aumentado en los últimos 18 años en un 40 % en el caso del cultivo de soja, y casi un 80 % en los cultivos de maíz (Fig. 1.1).

Además, recientemente, la tecnología de producción de cultivos ha cambiado significativamente y en un plazo muy corto de tiempo. Entre los años 1980 y 1990 se produjo un cambio tecnológico consistente en el reemplazo a gran escala de la labranza tradicional por labranza mínima o siembra directa, con escasa remoción del suelo, basada en el uso intensivo de agroquímicos (Bisang, R., 2003); asimismo, la producción se intensificó mediante un uso mayor de fertilizantes; más tarde se incorporaron cultivos transgénicos como maíz y algodón Bt (de la Fuente y Suarez, 2008), y en particular, la expansión explosiva del cultivo de la soja transgénica

tolerante al herbicida glifosato, que debido al aumento circunstancial de la rentabilidad internacional de dicho cultivo, provocó la adopción de lo que actualmente es en esencia un monocultivo reiterado (Fig. 1.2). Si bien se ve una importante merma de la producción debido a una gran sequía en el ciclo 2008/09 y en menor medida en el 2012/13, ésta tuvo un crecimiento constante desde comienzos del siglo 21.

Argentina: evolución de la superficie de cultivos GM (como % del total de cada cultivo)

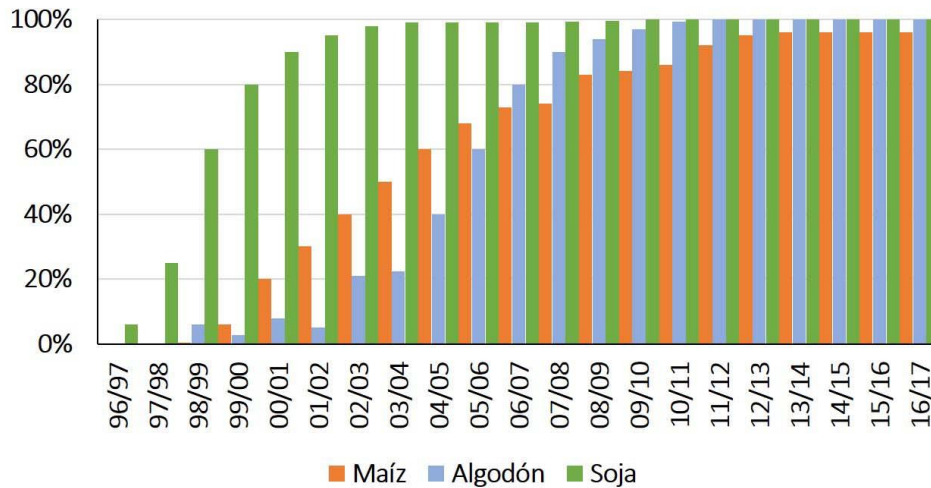


Fig. 1.1: ARGENTINA: Evolución de la superficie cultivada (como % de total de cada cultivo). FUENTE: ArgenBio, 2017.

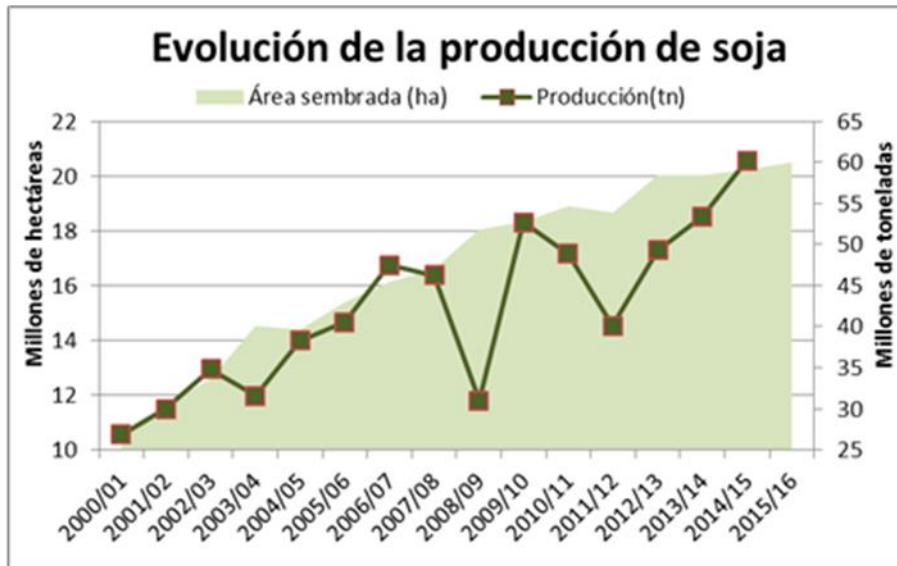


Fig. 1.2: Argentina: Evolución de la superficie del cultivo de soja.
 FUENTE: <http://news.agrofy.com.ar/especiales/soja15-16/siembra-soja>

Esta expansión produjo el desplazamiento de otros cultivos, el cambio de actividades productivas (tambos, actividades ganaderas) y el desmonte de otros ecosistemas (yungas, sectores del bosque chaqueño) para incorporarlos a la agricultura (Díaz Zorita et al., 2002). Y más recientemente, se empezó a difundir el manejo diferencial por ambientes a escala local o de parcela, también llamado “agricultura de precisión” (Satorre, E., 2005).

Estos cambios tecnológicos fueron acompañados por una expansión notable de la frontera agrícola hacia diversas zonas extra-pampeanas y por una agriculturización del sistema de rotación agrícola-ganadero en la región pampeana, proceso que llevó a una intensificación de la actividad agrícola y el corrimiento de la actividad ganadera hacia zonas marginales (Paruelo et al., 2005) y hacia ambientes confinados, conocidos como “feedlots” o engorde a corral (Herrero y Gil, 2008). Entre 1975 y 2005 el área destinada a cultivos alcanzó los 25,3 Mha como consecuencia de la reducción del área ganadera de 14 Mha y su incorporación a la explotación agrícola (Reca, L.G., 2006) (Fig. 1.3).

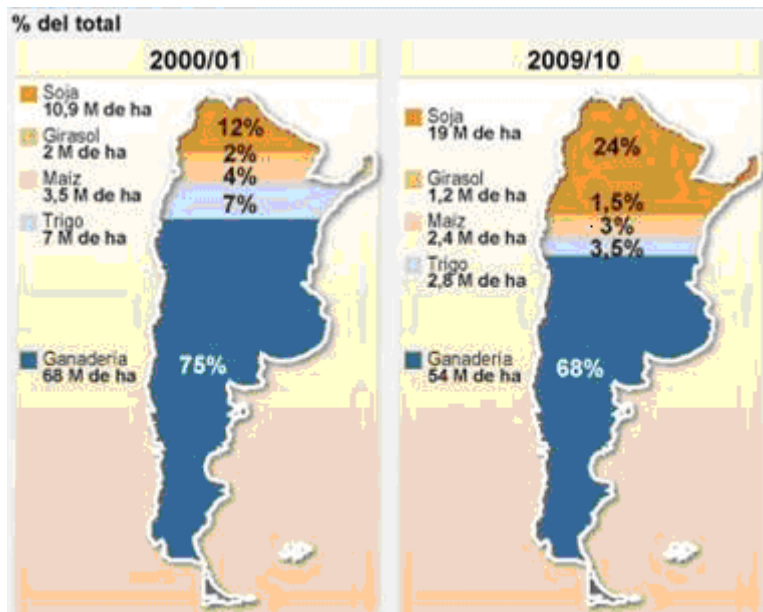


Fig. 1.3: La soja gana terreno a expensas de la ganadería. FUENTE: INTA, Agnitrend, Bolsa de Cereales.

En consecuencia, en apenas algo más de dos décadas, una mitad de la expansión del área agrícola se ha debido a la contracción de la ganadería bovina y la otra mitad al aumento del área total agropecuaria (Reca, L.G., 2006).

Servicios ecosistémicos y la biota edáfica

Según Levin (1999), “la naturaleza no es frágil (...) lo que es frágil son los servicios de los ecosistemas de los cuales depende el ser humano”.

Los servicios ecosistémicos son todos aquellos beneficios (directos e indirectos) que la sociedad apropia derivados de los ecosistemas naturales o transformados (ej. los agroecosistemas), las especies que lo conforman y los procesos que llevan adelante (Goldman et al., 2008). Se consideran beneficios directos la producción de provisiones –agua y alimentos (servicios de provisión), o la regulación de ciclos como las inundaciones, degradación de los suelos, desecación y salinización, pestes y enfermedades (servicios de regulación). Los beneficios indirectos se relacionan con el funcionamiento de procesos del ecosistema que genera los servicios directos (servicios

de soporte), como el proceso de fotosíntesis y la formación y almacenamiento de materia orgánica; el ciclo de nutrientes; la formación del suelo y la neutralización de desechos tóxicos. Los ecosistemas también ofrecen beneficios no materiales, como los valores estéticos y espirituales, o las oportunidades de recreación (servicios culturales). Existe, entonces, una amplia gama de servicios ecosistémicos, los cuales benefician a la gente de manera directa o indirecta (Fig. 1.4). La preservación de estos servicios ecosistémicos, se relaciona directamente con el concepto de manejo sustentable.



Fig. 1.4: Clasificación de tipos de Servicios Ecosistémicos. Tomado de MEA 2005, Chapin, Folke y Kofinas, 2009.

El suelo es un sistema que proporciona servicios ecosistémicos que son el resultado de una importante cantidad de procesos en los cuales los invertebrados juegan un rol preponderante. Cada componente de las comunidades edáficas tiene un rol determinado en su nicho específico que difícilmente pueda ser reemplazado por otros presentes en el sistema (Lavelle et al., 1997).

La intensificación de la agricultura, conduce a alteraciones ambientales que pueden representar impactos significativos sobre la capacidad productiva del agroecosistema (Sarandón y Sarandón, 1993). Las prácticas de manejo afectan a la biota del suelo de manera directa (p. ej. mortalidad) e indirecta (p. ej. oferta de alimento) afectando así la tasa de descomposición de materia orgánica y la dinámica de nutrientes (Altieri y Nicholls, 2008). Los cambios producidos en la estructura del ecosistema (diversidad, conectividad, resiliencia) debido al uso intensivo de agroquímicos, pueden producir una pérdida total o parcial de los servicios del ecosistema y en este caso, afectar la productividad y la sustentabilidad del recurso suelo en el mediano y largo plazo (Ehrenfeld, D., 2005).

El laboreo del suelo, por ejemplo, produce un cambio en la distribución de tamaños de los poros (Porta et al., 1999), produciendo una homogenización de los tamaños de los agregados y los espacios vacíos que quedan entre ellos; de esta manera, el espacio poroso del suelo pierde continuidad y se dificulta el movimiento del agua y del aire. Este deterioro físico afecta también a la biota edáfica, dado que la distribución y abundancia de la biota del suelo están determinadas por la disponibilidad de nutrientes y alimento, la textura y porosidad del suelo, la retención de agua y la existencia de depredadores y parásitos (Paoletti, M.G., 1999a). La biota del suelo, a su vez, influye en el tipo de humus que se forma, en las propiedades físicas y químicas que adquiere el suelo, y en la descomposición de la materia orgánica (Vedder et al., 1996; Michelena et al., 1998; Kandeler et al., 1999; Momo y Falco, 2003).

Así, las actividades agrícolas alteran los regímenes de temperatura y humedad y del intercambio de gases en el perfil del suelo, lo cual influye en la mineralización de los nutrientes y la materia orgánica (Magid et al., 1997; Myers et al., 1997). Estos cambios afectan tanto a las comunidades de microorganismos e invertebrados del suelo como a sus interrelaciones (Yeates y Bongers, 1999; Berkelmans et al., 2003; Zak et al., 2003; Brussaard et al., 2007).

Todos los grupos de la biota edáfica sufren la influencia del uso humano del suelo. La red trófica de la biota edáfica varía con el tiempo de colonización de la materia orgánica (Dilly y Irmiler, 1998) y, a medida que ésta se descompone, la comunidad asociada varía en su composición y diversidad. Las lombrices de tierra por ejemplo muestran cambios en la diversidad específica, número, biomasa, actividad y distribución espacial según el uso del suelo y su cobertura (Mather y Christensen, 1998; Falco y Momo, 1995); los microartrópodos también varían en abundancia y en variedad según la vegetación implantada y el uso del suelo, los cuales hacen variar factores tales como la humedad, la luz y los nutrientes (Deleporte y Tillier, 1999; Laiho et al., 2006).

“Los procesos ecológicos que operan en un ecosistema son, en gran medida, consecuencia de los organismos que lo habitan y de las interacciones entre éstos” (Martin Lopez et al., 2007). De esta manera, muchos de los procesos que regulan el funcionamiento de los ecosistemas son difícilmente asignables a una especie particular, y a menudo no es posible determinar la contribución relativa de cada especie a un proceso concreto, dada la naturaleza jerárquica de sus relaciones. Durante décadas, la aproximación más simple ha sido el relacionar el funcionamiento de los ecosistemas con la riqueza de especies. No obstante, esta aproximación ha resultado insuficiente y hoy en día la atención se vuelca hacia un enfoque más funcional, que intenta establecer relaciones entre las características de los organismos presentes (como por ejemplo el efecto de las especies dominantes, las especies claves, y las interacciones entre las especies, como competencia, mutualismo, predación) y los procesos y servicios de los ecosistemas (Hooper et al., 2005; Díaz et al., 2005).

Cada sistema ecológico se caracteriza por sus redes tróficas con proporciones particulares de productores, descomponedores y consumidores. A su vez, las diferencias en estas proporciones se pueden observar dentro de cada nivel trófico o en cada grupo funcional, siendo el reflejo del clima, vegetación, suelo, historia del uso del suelo y de los disturbios.

El entramado de interacciones refleja la estructura de la biota del suelo. En función del tipo de interacción que observemos nos encontramos con redes de competidores, redes tróficas, redes mutualistas, o redes de facilitación (Labrador, J., 2008). La estructura de las redes ecológicas condiciona la mayoría de las funciones y servicios de los ecosistemas. El reciclado de nutrientes, los flujos de agua y de carbono, entre otras muchas funciones, se alteran cuando la arquitectura de estas redes se pierde (Labrador, J., 2008).

Importancia de los grupos faunísticos

La importancia de la macrofauna reside en su papel como ingenieros del ecosistema, ya que aportan a la estructura del suelo a través de cambios físicos construyendo galerías, modificando la porosidad, favoreciendo la circulación del aire y el agua; y cambios químicos por acción de sus deyecciones, secreciones, excreciones, y aún con sus propios cadáveres, enriqueciendo el medio edáfico, destruyendo mecánicamente los restos vegetales que componen la hojarasca hasta su desmenuzamiento, y así aumentan la superficie expuesta al ataque de las microflora (Lavelle et al., 1997). Todas estas acciones favorecen la heterogeneidad de hábitats, lo que brinda una mayor variedad de hábitats que permiten albergar una mayor diversidad biológica.

Los grupos que conforman la macrofauna del suelo, varían en su composición, abundancia y diversidad, atributos que, como se ha consignado mas arriba, dependen a su vez del estado de perturbación del suelo causado por el cambio de uso de la tierra, lo que permite valorar estas comunidades como bioindicadores de calidad (Stork, N.E., 1995; Pashanasi, B., 2001; Lavelle et al., 2003; Cabrera et al., 2011).

La importancia de la mesofauna edáfica en un ecosistema radica en su diversidad estructural y funcional al contribuir, en interacción con el resto de la biota, a la descomposición de la materia orgánica y al ciclo de nutrientes. Los primeros reportes sobre el uso de los grupos que integran la mesofauna edáfica como

indicadores biológicos a escala mundial fueron publicados por Hermosilla et al. (1977), al estudiar pastizales con diferentes grados de perturbación en Argentina. Los integrantes de esta mesofauna han mostrado ser para varios autores, bioindicadores excelentes de la calidad del suelo debido a su abundancia y riqueza de especies, y su casi omnipresencia en todos los suelos, (Paoletti et al., 1991; Van Straalen, N.M., 1998; Behan-Pelletier, V., 1999; Bedano et al., 2001, 2011).

La mesofauna del suelo es dominada por ácaros y colémbolos, los cuales están entre los artrópodos más abundantes y ampliamente distribuidos en la mayoría de los suelos.

Dentro de los ácaros (subclase Acarí), los oribátidos (O. Sarcotiformes, sub O. Oribatida) son considerados buenos indicadores de las condiciones del suelo. Se ha mostrado que el efecto de la agricultura en los ácaros oribátidos es negativo, ya que son particularmente vulnerables a los disturbios (Behan-Pelletier, V., 1999; Bedano et al., 2006). Su vulnerabilidad ha sido relacionada a sus generalmente bajos índices metabólicos y baja fecundidad, con lo cual sus poblaciones no pueden responder con rapidez para acceder al rápido incremento de recursos causado por los pulsos de la productividad primaria característicos de las actividades agrícolas (Behan-Pelletier, V., 1999). Dentro de este sub orden también se encuentran los astigmados (Astigmata), los cuales pertenecen al grupo trófico de los fungívoros y son considerados buenos indicadores de los suelos perturbados porque sobreviven a condiciones ambientales desfavorables (Andrés, P., 1990).

Los mesostigmata (O. Mesostigmata) según Chocobar (2010) son un taxón sensible a los suelos perturbados y a los cambios desfavorables en las precipitaciones y en la humedad del suelo, lo cual puede deberse a la fragilidad de su cuerpo. Estas características los convierten en buenos indicadores de la calidad de los suelos, al presentar una mayor abundancia en los que están menos perturbados.

Los prostigmados (O. Trombidiformes, sub O. Prostigmata), sin embargo, son dominantes en los suelos pobres en nutrientes y con bajos valores de carbonato de

calcio, bajo contenido de materia orgánica y poca humedad. En su gran mayoría son depredadores, con estructura frágil y pequeño tamaño, por lo que presumiblemente tienen una notable sensibilidad ante las fluctuaciones de las condiciones hídricas del sustrato (Andrés, P., 1990). Son más abundantes en áreas perturbadas debido a que tienen un alto potencial reproductivo; esto les permite adaptarse al efecto del factor perturbador, por lo que, en ausencia relativa de depredadores y competidores por el alimento, pueden aumentar rápidamente en número. Este grupo, por sus características ecológicas, también constituye un buen indicador.

Asimismo, los colémbolos (Clase Collembola) son, según Stork (1995), considerados buenos bioindicadores, ya que además de estar muy bien representados en términos de biodiversidad, también responden a una variedad de factores ambientales y ecológicos. Son señalados como sensibles a las prácticas agrícolas (Neave y Fox, 1998; Fox et al., 1999). Y varios autores han destacado que la agricultura intensiva tiende a disminuir la abundancia de colémbolos (Chagnon et al., 2000; Culik et al., 2002; Maraun et al., 2003) y su diversidad (Ponge et. al., 2003; Sousa et al., 2006).

La microfauna a su vez, influye en la tasa de recambio por su papel como forrajeros de raíces (parásitos de plantas), micófagos, bacteriófagos, omnívoros y depredadores, normalmente representan una riqueza genérica y de especies muy alta, juegan un papel importante en la regulación de abundancia y actividad microbiana, y como patógenos, representan un importante control biológico (Lavelle, P., 1996).

Índices e indicadores

El suelo, como el aire y el agua, es un componente integral de nuestro medioambiente, y junto con el agua constituye el más importante recurso natural (FAO, 2015). El uso adecuado de este vital recurso es esencial para un desarrollo sustentable y para la alimentación, generación de bienes y prestación de servicios ecosistémicos demandados por una creciente población humana. Pero el suelo, a

diferencia del agua y del aire no tiene estándares de calidad definidos debido a su variabilidad, por lo que es casi imposible establecer una simple medida física, química o biológica que la refleje adecuadamente (Bandick y Dick, 1999). Por tal motivo es de suma importancia desarrollar índices que incluyan algún conjunto de estas variables de manera que reflejen apropiadamente los cambios en la capacidad del suelo y en su función (Dalurzo et al., 2002).

Un apropiado índice de calidad del suelo debe comprender tres objetivos dentro de sus componentes: calidad ambiental, sustentabilidad agronómica y viabilidad socio-económica (Andrews et al., 2002). Para que esto sea posible, un índice de calidad del suelo debe estar conformado por determinados indicadores, dependiendo del tipo de estudio que se quiera llevar a cabo, y del objetivo de dicho estudio.

Un indicador es una variable que resume o simplifica información relevante haciendo que un fenómeno o condición de interés se haga perceptible y que sintetiza, cuantifica y comunica información relevante de manera comprensible (Cantú et al., 2007).

De acuerdo con Doran y Safley (1997) y Beare et al. (1997), para que los indicadores de calidad del suelo sean útiles para una variedad de usuarios que incluya a los agricultores, a los extensionistas, investigadores y tomadores de decisión, éstos deberán:

- Ser relativamente precisos y fáciles de interpretar.
- Ser relativamente económicos.
- Ser suficientemente sensibles como para reflejar el impacto de las prácticas de manejo de suelo y del clima en los cambios de largo plazo; pero no tan sensitivos que puedan ser afectados por los patrones meteorológicos de corto plazo.

- Integrar las propiedades y procesos físicos, químicos y biológicos y servir como insumos básicos para la evaluación de propiedades o funciones del suelo que son más difíciles de medir en forma directa.
- Tener una buena correlación con los procesos del ecosistema y con la productividad de plantas y animales.
- Ser relativamente fáciles y prácticos para que los agricultores, extensionistas, especialistas e investigadores puedan usarlos en condiciones de campo.

La selección de indicadores claves y sus niveles umbrales, los cuales deben mantenerse para un normal funcionamiento del suelo, es requerida para monitorear:

- La dirección del cambio: positivo o negativo, aumento o disminución, etc.
- La tasa de cambio: duración (meses, años).
- La magnitud del cambio: porcentaje del cambio en relación con los valores base.
- La extensión del cambio: porcentaje del área que está siendo monitoreada; por ej., qué porcentaje de la región ha cambiado con respecto al indicador seleccionado en un período específico.

y para determinar tendencias en mejoras o deterioros en la calidad del suelo de varios ecosistemas (Arshad y Martin, 2002).

La Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Ambiente y el Desarrollo - Río '92 (UNCED) marcó un hito muy especial al establecer la necesidad de desarrollar y aplicar diferentes metodologías para determinar el estado del ambiente y monitorear los cambios ocurridos a nivel local, regional y global. La determinación de estos cambios podría ayudar a realizar una mejor evaluación de las dimensiones de los diferentes problemas ambientales, identificar y evaluar los resultados de la aplicación de las convenciones internacionales y los programas de acción, como así también, orientar las políticas nacionales. La aplicación del Capítulo 40 de la Agenda 21 condujo al desarrollo de diversas metodologías que determinaron el uso generalizado de

indicadores e índices para la evaluación de la calidad ambiental, calidad de suelos, sustentabilidad, desarrollo sustentable, riesgo, vulnerabilidad, planificación territorial, entre otros (Cantú et. al., 2007).

Gran parte de los organismos del suelo depende de la calidad de éste para su supervivencia. Asimismo, la abundancia, estructura y funcionamiento de la biota edáfica, al ser mediadora de los procesos de descomposición y ciclado de nutrientes, influye en su uso sustentable. Por ende, la protección de este recurso natural debe formar parte de políticas nacionales e internacionales. Para lograr un manejo adecuado del suelo, asegurar su protección y garantizar la sustentabilidad a mediano y largo plazo es necesario contar con indicadores que permitan evaluar su estado.

El desarrollo de tales indicadores debe hacerse considerando aquellas propiedades edáficas sensibles a los cambios provocados por los diferentes usos del recurso suelo.

La evaluación sistemática y permanente del estado del recurso suelo es pues, una actividad que requiere del desarrollo de índices integrados y estandarizados, utilizables a distintas escalas espaciales y temporales y que permitan la detección temprana del deterioro del suelo (Alkorta et al., 2003). Existen actualmente técnicas físicas y de análisis químicos estandarizadas, que evalúan el estado instantáneo del suelo. Sin embargo, estas técnicas no evalúan los procesos dinámicos que afectan la estabilidad estructural y ciclo de nutrientes. Dado que la estabilidad estructural y el ciclo de nutrientes del suelo influyen en, y dependen críticamente de, la actividad de la biota del suelo, es necesario evaluar el impacto que estos cambios puedan tener en los organismos que la componen y de esta manera desarrollar índices biológicos que sinteticen y den cuenta de estos cambios. A través de la evaluación de los mismos, estaremos en condiciones de proponer herramientas que permitan predecir tendencias bajo diferentes manejos, promover el uso sostenible de este recurso e iniciar el proceso de eco certificación del uso sustentable de los suelos, práctica de uso incipiente en otros lugares del mundo.

Paoletti (1999 a, b) definió un bioindicador como “una especie o ensamble de especies que están particularmente bien correspondidas con características específicas del paisaje y/o reaccionan a impactos y cambios”.

Es muy difícil crear reglas o criterios básicos para los bioindicadores, debido a la alta diversidad de los objetivos para los que el indicador tiene que servir. En definitiva, los límites y la demanda básica con los cuales debe estar relacionado un indicador tienen que ser estudiado caso por caso.

La utilización de la biota edáfica como bioindicador de fertilidad del suelo, es entonces importante ya que su actividad influye en la tasa de descomposición de la materia orgánica, en el suministro de nutrientes, la infiltración, la conductividad hidráulica, la deposición de solutos a través del suelo, y en última instancia en el ciclado de los nutrientes de los que depende en gran medida la sustentabilidad del suelo (Brussaard, L., 1997). En este contexto, la medición de parámetros tales como abundancia, diversidad o actividad de la biota edáfica son importantes factores a ser considerados (Labrador, J., 2008). Las propiedades biológicas del suelo son además muy dinámicas por lo que tienen la ventaja de servir de señales tempranas de degradación o de mejoría de los suelos.

Las alteraciones generadas por el tipo de sistema de labranza, son básicamente debidas al tipo de remoción realizada por el uso de la tierra (Falco y Momo, 1995; Römbke et al., 2005) las cuales generan cambios en los gradientes de humedad, temperatura, capacidad de retención de agua, espacio poroso, contenido de aire y densidad. Si a estas alteraciones se les suma la acción de los insecticidas y herbicidas, es claro que la biota del suelo reflejará dichos cambios en términos de conectividad, diversidad y redes tróficas (Swift et al., 2012).

Gil (2004) determina la importancia de la biota en la capacidad de almacenaje de agua. Los suelos de la región pampeana en su mayoría de textura media, dependen fundamentalmente de los mecanismos bióticos para mantener su estructura. En

muchos suelos de la región pampeana bajo siembra directa, se observa que aún con valores de porosidad total comparables, la conductividad hidráulica, la cual representa la mayor o menor facilidad con que el medio deja pasar el agua, aumenta significativamente por la actividad de las lombrices, insectos de suelo y raíces (Gil, R., 2007).

Las propiedades biológicas (ej. respiración, abundancia de colémbolos, ácaros, lombrices de tierra), como indicadores biológicos, son más dinámicas y, por lo tanto, tienen la ventaja de servir como señales tempranas de degradación o de mejoría de los suelos (Astier-Calderón et al., 2002). Debido a esto, existe actualmente la necesidad de trabajar con los grupos biológicos como herramienta para monitorear la salud del suelo, entre los cuales podemos citar el uso de la comunidad de artrópodos como respuesta a la acción indirecta de los plaguicidas y sistema de labranza (Ferrero, O., 2005). Esto es así, porque se ha avanzado en el reconocimiento de que, a diferencia de las variables físicas o químicas que ya cuentan con una valoración (alto –medio – o bajo) de las comunidades biológicas usualmente sólo se tiene en cuenta la riqueza (como número de especies) o algunos índices de riqueza específica, con muy poca información disponible que vincule los grupos funcionales con el funcionamiento del ecosistema (Bunning y Jiménez, 2003).

Por tal motivo, es de suma importancia contar con un conjunto mínimo de indicadores de calidad de suelo, de simple medición que pueda ser utilizado por agencias gubernamentales y responsables del manejo del suelo en la evaluación y seguimiento en el tiempo de la calidad de este recurso (Cantú et. al., 2007).

Sin embargo la aplicación de indicadores biológicos en suelos es a menudo limitada por las dificultades en la clasificación de los microartropodos. La identificación taxonómica de los invertebrados del suelo se considera una limitación importante para la adopción de estos organismos en los programas de monitoreo del suelo (Gardi et al., 2009).

Si bien es posible que el nivel preferible sea el de especie, la taxonomía de estos grupos hace el trabajo prácticamente inviable en muchos lugares en gran parte por el coste económico que ello comporta (en forma de tiempo para el examen de las muestras). Por ello un buen equilibrio entre calidad de los resultados y tiempo requerido para obtenerlos se da utilizando como nivel taxonómico la familia.

Varios autores, han demostrado que el uso de grupos de nivel taxonómico aún mayor como los niveles de macrofauna (Nahmani et al., 2006; Biaggini et al., 2007) y mesofauna (Bedano y Ruf, 2010) pueden proporcionar también información importante sobre la situación del suelo.

Resumiendo, los indicadores de la calidad del suelo deberían cumplir con los siguientes criterios (Doran y Zeiss, 2000): 1) sensibilidad a la variación en el manejo del suelo; 2) buena correlación con las funciones del suelo; 3) ser útil para revelar los procesos del ecosistema; 4) comprensible y útil para quienes toman decisiones de manejo; 5) baratos y fáciles de medir. Así, la calidad del suelo puede ser evaluada usando un gran número de indicadores (químicos, físicos y biológicos) dependiendo de la escala y el objetivo de la evaluación.

El aporte de este proyecto es el de trabajar con grupos de la biota edáfica, generando una visión integradora de lo que acontece en el suelo debido a la actividad agropecuaria y con esta información de base, desarrollar indicadores que permitan inferir la calidad del suelo.

OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar y cuantificar efectos directos e indirectos de diferentes grados de intensidad de uso del suelo sobre la estructura de una parte de la comunidad biótica (abundancia, riqueza y diversidad) y parámetros físico – químicos del ecosistema

edáfico, para el desarrollo de indicadores biológicos de detección temprana del deterioro de los suelos.

Objetivos Específicos

1. Caracterizar los tres sistemas de uso de suelo seleccionados desde el punto de vista físico-químico.
2. Determinar si las diferencias en la intensidad de uso del suelo se relacionan con diferencias en la actividad microbiana, medida a través de la respiración edáfica y la actividad enzimática.
3. Identificar los grupos de organismos pertenecientes a la macro y mesofauna que sean sensibles a los diferentes grados de intensidad de uso a través del análisis de parámetros de sus comunidades.
4. Evaluar la correlación entre los grupos seleccionados en los puntos 2 y 3, y las variables físicas y químicas medidas.
5. A partir de la información obtenida generar índices de la calidad de suelo que permitan evaluar y detectar problemas en el funcionamiento del suelo y facilitar la identificación de sistemas de uso adecuados que permitan implementar procesos de recuperación de éste.

HIPÓTESIS DE TRABAJO

Sistemas con diferentes intensidades de uso de los suelos, presentan diferencias en la riqueza, diversidad y abundancia de sus comunidades de biota edáfica, cambios que a su vez afectaran y serán afectados por diferentes propiedades físicas y químicas de los suelo. Estas variaciones en la biota del suelo, representan una respuesta integrada que puede ser utilizada como indicadora de la calidad del suelo.

BIBLIOGRAFÍA

- Alkorta, I., Aizpurua, A., Riga, P., Albizu, I., Amezaga, I., Garbisu, C. 2003. Soil enzyme activities as biological indicators of soil health. *Rev. Environ. Health* 18: 65-73
- Altieri, M.A., Nicholls, C. I., 2008. Suelos saludables, plantas saludables: la evidencia agroecológica. *Leisa revista de agroecología*. 24: 6-8.
- Andreasen, J.K., O'Neill, R.V., Noss, R., Slosser, N.C., 2001. Considerations for the development of a terrestrial index of ecological integrity. *Ecological Indicators* 1: 21–35.
- Andrés, P. 1990. Descomposición de la materia orgánica en dos ecosistemas forestales del macizo del Montseny (Barcelona): papel de los ácaros oribátidos (Acarina, Oribatei). Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona. 237 p.
- Andrews, S., Karlen, D., Mitchell, J., 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 90: 25–45.
- Argenbio 2017, www.argenbio.org.
- Arshad, M.A., Martin, S., 2002. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 8: 153–160.
- Astier-Calderón, M., Maass-Moreno, M., Etchevers-Barra, J., 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el Contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia* 36: 605-620.
- Bai, Z.G., Dent, D.L., Olsson, L., Schaepman, M.E., 2008. Global assessment of land degradation and improvement. 1. Identification by remote sensing. Report 2008/01 ISRI – World Soil Information, Wageningen.
- Bandick, A.K., Dick, R.P., 1999. Field management effects on soil enzyme activities. *Soil Biol. Biochem.* 31: 1471-1479.
- Beare, M.H., Reddy, M.V., Tian, G., Srivastava, S.C., 1997. Agricultural intensification, soil biodiversity and agroecosystem function in the tropics: the role of decomposer biota. *Applied Soil Ecology*, 6: 87-108.
- Bedano, J.C., Cantú, M.P., Doucet, M.E., 2001. La utilización de ácaros edáficos como indicadores de calidad de suelos en agroecosistemas del centro de Argentina. Memorias. XV Congreso Latinoamericano de las Ciencias del Suelo. [CD-ROM]. Varadero, Cuba.

- Bedano, J.C., Cantu, M.P., Doucet, M.E., 2006. Influence of three different land management practices on soil mite (Arachnida: Acari) densities in relation to a natural soil. *Appl. Soil Ecol.* 32: 293–304.
- Bedano, J.C., Ruf, A., 2010. Sensitivity of different taxonomic levels of soil Gamasina to land use and anthropogenic disturbances. *Agricultural and Forest Entomology* 12: 203–212.
- Bedano, J.C., Domínguez, A., Arolfo, R., 2011. Assessment of soil biological degradation using mesofauna. *Soil & Tillage Research* 117: 55-60.
- Behan-Pelletier, V., 1999. Oribatid mite biodiversity in agroecosystems: role for bioindication. *Agric. Ecosyst. Environ.* 74: 411–423.
- Berkelmans, R., Ferris, H., Tenuta, M., Van Bruggen, H.A.C., 2003. Effects of long-term crop management on nematode trophic levels other than plant feeders disappear after 1 year of disruptive soil management. *Applied Soil Ecology*, 23: 223-135.
- Biaggini, M., Consorti, R., Dapporto, L., Dellacasa, M., Paggeti, E., Corti, C., 2007. The taxonomic level order as a possible tool for rapid assessment of arthropod diversity in agricultural landscapes. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 122: 183-191.
- Bisang, R., 2003. Estructura económica, innovación y estructura productiva: la aplicación e biotecnología en la producción agrícola Pampeana Argentina. *Desarrollo Económico* 43: 13-440.
- Brundtland Report, 1987. World Commission on Environment and Development (WCED): Our Common Future
- Brussaard, L., 1997. Biodiversity and Ecosystem Functioning in Soil. *Ambio* Vol. 26 N° 8.
- Brussaard, L., De Ruyter, P.C., Brown G.G., 2007. Soil biodiversity for agricultural sustainability. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 121: 233- 244.
- Bunning, S., Jiménez J. J., 2003. Indicators and Assessment of Soil Biodiversity/Soil Ecosystem Functioning for Farmers and Governments. OECD Expert Meeting on indicators of Soil Erosion and Soil Biodiversity.
- Cabrera, G., Robaina, N., Ponce de León, D., 2011. Riqueza y abundancia de la macrofauna edáfica en cuatro usos de la tierra en las provincias de Artemisa y Mayabeque, Cuba. *Pastos y Forrajes*. 34:313.

- Carta Acuerdo FAO-UNSAM, 2014. Identificación de potenciales nuevas áreas de regadío y de riego complementario en la zona Nordeste de la Argentina. http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/rlc/utf017arg/anexosyapendices/3.RiegoComplementario/apendices/b._Consideraciones_Ambientales_riego.pdf
- Casas, R.R., 1998. Causas y evidencias de la degradación de los suelos en la región Pampeana. En: *Hacia esa agricultura productiva y sostenible en la pampa*. Harvard University; David Rockefeller Center for Latin American Studies; Consejo Profesional de Ingeniería Agronómica. Orientación Gráfica Editora S.R.L. Buenos Aires.
- Casas, R.R., 2001. *Disertación: La Conservación de los Suelos y la Sustentabilidad de los Sistemas Agrícolas*.
- Casas, R.R., 2005. Efecto de la intensificación agrícola sobre los suelos. *Ciencia Hoy*; Vol. XV. N° 87, Junio – Julio. pp. 42-43.
- Cantún, M.P., Becker, A., Bedano, J.C., Schiavo H.F., 2007. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del Suelo. Revista de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo*.
- Chagnon, M., Hébert, C., Paré, D., 2000. Community structures of Collembola in sugar maple forests: 20 relations to humus type and seasonal trends. *Pedobiologia*, 44: 148-174.
- Chocobar, E. A. 2010. Edafofauna como indicador de la calidad en un suelo Cumulic Phaozem sometido a diferentes sistemas de manejos en un experimento de larga duración. Tesis en opción al grado científico de Máster en Ciencias, Especialista en Edafología. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 63 p.
- Culik, M., de Souza J., Ventura, J., 2002. Biodiversity of Collembola in tropical agricultural environments of Espirito Santo, Brazil, *Appl. Soil Ecol.* 21: 49–58.
- Dalurzo, H.C., Serial, R.C., Vazquez, S., Ratto, S., 2002. Indicadores químicos y biológicos de la calidad de suelos en Oxisoles de Misiones (Argentina). Facultad de Ciencias Agrarias-UNNE.
- de la Fuente, E.B., Suarez, S., 2008. Problemas ambientales asociados a la actividad humana: la agricultura. *Ecología Austral*, 18: 239-252.
- Deleporte, S., Tillier, P., 1999. Long-term effects of mineral amendments on soil fauna and humus in an acid beech forest floor. *Forest Ecology & Management* 118:245-252.
- Díaz, S., Tilman D., Fargione J., Chapin III F.S., Dirzo R., Kitzberger T., Gemmill B., Zobel M., Vilà M., Mitchell C., Wilby A., Daily G.C., Galetti M., Laurance W.F., Pretty J.,

- Naylor R., Power A., Harvell D., 2005. Biodiversity regulation of ecosystem services. En *Ecosystems and human well-being: Current state and trends*. (Eds. Hassan, R., Scholes, R. y Ash, N.), pp. 297-329. Island Press, Washington D.C.
- Díaz-Zorita, M., Duarte, G., Grove, J., 2002. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semi-arid Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 65: 1-18.
- Dilly, O., Irmiler, U., 1998. Succession of the food web during the decomposition of leaf litter in a black alder (*Alnus glutinosa* (Gaertn.) L.) forest. *Pedobiologia* 42: 109-123.
- Doran, J.W., Parkin, T.B., 1994. Defining and assessing soil quality. Pages 3-21 in J. W. Doran et al., (eds.) *Defining soil quality for a sustainable environment*. Soil Science Society of America Special Publication N° 35, Madison, WI.
- Doran, J.W., Safley, M., 1997. Defining and assessing soil health and sustainable productivity. In: "Biological indicators of soil health". P. 1-28. Pankhurst C., Double, B.M. and Gupta, V.V.S.R. (eds.), CAB International, Wallingford, U.K.
- Doran, J.W., Zeiss, M.R., 2000. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology* 15: 3–11.
- Ehrenfeld, D. 2005. "Sustainability: Living with imperfection," *Cons. Biol.* 19 (1) 33-35.
- Evans, L.T., 1993. Crop yield and world food supply. 2 Pp. 32-61 en Evans, L. (ed.). *Crop evolution, adaptation and yield*. Cambridge University.
- Ewers, R.M., Scharlemann, J.P.W., Balmford, A., 2009. Do increases in agricultural yield spare land for nature? *Global Change Biology* 15: 1716-1726.
- Ferrero, O., 2005 *La sustentabilidad agrícola en la Pampa interior (Argentina): desarrollo y evaluación de indicadores de impacto ambiental del uso de pesticidas y labranzas usando lógica difusa*. Tesis Doctoral, Cap. IV- UBA.
- Falco, L.B., Momo, F., 1995. Asociaciones de lombrices de tierra y su relación con la cobertura vegetal en suelos forestados. *Revista Chilena de Historia Natural*. 68:523 -528. ISSN/ISBN: 0716-078X.
- FAO 2015. El suelo es un recurso no renovable su conservación es esencial para la seguridad alimentaria y nuestro futuro sostenible. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. www.fao.org.
- Fox, C.A., Fonseca, E.J.A., Miller, J.J., Tomlin, A.D., 1999. The influence of row position and elected soil attributes on Acarina and Collembola in no-till and conventional continuous corn on a clay loam soil. *Applied Soil Ecology*. Volume 13, Issue 1, 1–8

- Garbisu, C., Becerril, J.M., Epelde, L., Alkorta, I., 2007. Bioindicadores de la calidad del suelo: herramienta metodológica para la evaluación de la eficacia de un proceso fitorremediador. *Ecosistemas* 16 (2): 44-49.
- García, F.O., 2001. Hacia la sustentabilidad nutricional de los suelos. En: siembra directa: resúmenes del primer seminario de AAPRESID para estudiantes. AAPRESID, 101 pp.
- Gardi, C., Montanarella, L., Arrouays, D., Bispo, A., Lemanceau, P., 2009. Soil biodiversity monitoring in Europe: ongoing activities and challenges. *European Journal of Soil Science*, 60: 807-819.
- Gil, R., 2004. Seminario "Sustentabilidad de la Producción Agrícola" JICA – INTA. Buenos Aires.
- Gil, R., 2007. El comportamiento físico-funcional de los suelos. Algunos criterios para la cuantificación y diagnóstico del comportamiento estructural del suelo, y su relación con la dinámica del agua y la producción de los cultivos. *AgroEstrategias*.
- Goldman R.L., Thompson B.H., Daily, G.C., 2008. "Managing for ecosystem services on U.S. agricultural lands". En U.S. agricultural policy and the 2007 farm bill, K. Arha, T. Josling, D. A. Sumner, and B. H. Thompson (editores): 97–111. Stanford, CA: Woods Institute for the Environment.
- Hall, A., Rebella, C., Ghera, C., Culot, J., 1992. Field-crop systems of the Pampas. In: Pearson, C. (Ed.), *Field Crop Ecosystems*. Elsevier, Amsterdam, pp. 413–450.
- Hermosilla, W., Rea, A.R., Pujalte, J.C., Rubio, Y., 1977. Efectos de la compactación del suelo sobre la fauna edáfica en campos pastoreados Partido de Chascomús, provincia de Buenos Aires. *Physis. Secc. C.* (Buenos Aires). 36 (92):227.
- Herrero, M.A., Gil, S.B., 2008. Consideraciones ambientales de la intensificación en producción animal. *Ecol. Austral* 18: 273-289.
- Hooper, D.U., Chapin III, F.S., Ewel, J.J., Hector, A., Inchausti, P., Lavorel, S., Lawton, J.H., Lodge, D.M., Loreau, M., Naeem, S., Schmid, B., Setälä, H., Symstad, A.J., Vandermeern, J., Wardle, D.A., 2005. Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecological Monographs* 75: 3-35.
- Kandeler, E., Palli, S., Stemmer, M., Gerzabek, M.H., 1999. Tillage changes microbial biomass and enzyme activities in particle size fractions. *Soil Biol. Biochem.* 31, 1253–1264
- Labrador, J., 2008. Manejo del suelo en los sistemas agrícolas de producción ecológica. Manual técnico manejo del suelo en los sistemas de producción ecológica. SEAE (Sociedad Española de Agricultura Ecológica).

- Laiho, R., 2006. Decomposition in peatlands: Reconciling seemingly contrasting results on the impacts of lowered water levels. *Soil Biology and Biochemistry*, 38: 2011-2024.
- Lavelle, P., 1996. Diversity of Soil Fauna and Ecosystem Function. *Biology International*, N° 33.
- Lavelle, P., Bignell, D., Lepage, M., Wolters, V., Roger, P., Heal, O., Dhillion, S., 1997. Soil function in a changing world: The role of the invertebrate ecosystem engineers. *European Journal of Soil Biology*, vol. 33, pp. 159–193.
- Lavelle, P., Senapati, B., Barros, E., 2003. Soil macrofauna. In: *Trees, crops and soil fertility. Concepts and research methods.* (Eds. G. Schroth & F.L. Sinclair). CABF Publishing. UK. p. 303.
- Levin, S., 1999. *Fragile dominion: complexity and the commons.* Perseus Books. Cambridge, MA, 250 pp. ISBN 0738201111.
- Magid, J., Muller, T., Jensen, L.S., Nielsen, N.E., 1997. Modeling the measurable: interpretation of field-scale CO₂ and N-mineralization, soil microbial biomass and light fractions as indicators of oilseed rape, maize and barley straw decomposition. 26 Pp. 349-362 en Cadish, G & KE Giller (eds.). *Driven by nature. Plant litter quality and decomposition.* CAB International, UK.
- Maraun, M., Salamon, J., Schneider, K., Schaefer, M., Scheu, S., 2003. Oribatid mite and collembolan diversity, density and community structure in a modern beech forest (*Fagus sylvatica*): effects of mechanical perturbations, *Soil Biol. Biochem.* 35: 1387–1394.
- Martelotto, E., Salas, H., Lovera, E., 2001. Soja... al monocultivo?. *Revista Fertilizar*, 24: 18-22.
- Martín-López, B., González, J.A., Díaz, S., Castro, I., García-Llorente, M., 2007. Biodiversidad y bienestar humano: el papel de la diversidad funcional. *Ecosistemas* 16 (3): 69-80.
- Mather, J.G., Christensen, O.M., 1998. Behavioural aspects of the 'New Zealand flatworm', *Artioposthia triangulata*, in relation to species spread. *Pedobiologia*, 42: 520-531.
- Michelena, R.O., Iruetia, C.B., Pittaluga, A., Vavruska, F., de Sardi, M.E. B., 1988. Degradación de los suelos en el sector norte de la Pampa Ondulada. *Ciencia del Suelo*, 6: 60-66.

- Momo, F., Falco, L.B., 2003. Mesofauna del suelo. Biología y ecología. Páginas 51-58 en Albanesi, A., editor. Microbiología Agrícola. Un Aporte de la Investigación Argentina. Editorial de la Universidad Nacional de Santiago del Estero, Santiago del Estero.
- Musto, J.C., 1979. La degradación de los suelos en la Republica Argentina. Publ. No. 67, CIRN INTA. INTA, Buenos Aires, p. 12.
- Myers, R.J.K, Van Noorwijk, M., Vityakon, P. 1997. Synchrony of nutrient released and plant demand: plant litter quality soil environment and farmer management options. 17 Pp. 215-230 en Cadish, G & KE Giller (eds.). Driven by nature. Plant litter quality and decomposition. CAB International, UK.
- Nahmani, J., Lavelle, P., Rossi, J.P., 2006. Does changing the taxonomical resolution alter the value of soil macroinvertebrate as bioindicators of metal pollution? Soil Biol. Biochem. 38: 385–396.
- Neave, P., Fox, C.A., 1998. Response of soil invertebrates to reduced tillage systems established on a clay loam soil. Applied Soil Ecology 9: 423-428
- Oosterheld, M., 2008. Impacto de la agricultura sobre los ecosistemas. Fundamentos ecológicos y problemas más relevantes. Ecología Austral 18: 337-346.
- Panigatti, J.L., 2010. Argentina 200 años, 200 suelos. Ed. INTA Buenos Aires. 345 pp. Ilustraciones y cuadros.
- Paoletti, M.G., Favretto, M.R., Stinner, B.R., Purrington, F.F., Bater J.E., 1991. Invertebrates as bioindicators of soil use. p. 341 -362. In D.A. Crossley Jr., et al. (eds.). Modern techniques in soil ecology. Elsevier, Nueva York, p
- Paoletti, M.G., 1999a. Using bioindicators based on biodiversity to assess landscape sustainability. In: Paoletti, M.G. (Ed.), Invertebrate Biodiversity as Bioindicators of Sustainable Landscapes. Agric. Ecosyst. Environ. 74: 1–18.
- Paoletti, M.G., 1999b. The role of earthworms for assessment of sustainability and as bioindicators. In: Paoletti, M.G. (Ed.), Invertebrate Biodiversity as Bioindicators of Sustainable Landscapes. Agric. Ecosyst. Environ. 74: 137–155.
- Paruelo, J.M., Guerschman, J.P., Verón, S. R., 2005. Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. Ciencia Hoy 15: 14-23.
- Pashanasi, B., 2001. Estudio cuantitativo de la macrofauna del suelo en diferentes sistemas de uso de la tierra en la Amazonia Peruana. *Folia Amazónica*. 12:75.

- Pla Sentís, I., 2013. Aproximaciones empíricas para la evaluación de la calidad del suelo: ventajas e inconvenientes. XX Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo San Juan de los Morros, 25 al 29 de noviembre 2013.
- Plucknett, D.L., 1993. International Agricultural Research for the next century. *BioScience* 43: 432-440.
- Ponge, J.F., Gillet, S., Dubs, F., Fedoroff, E., Haese, L., Sousa, J.P., Lavelle, P., 2003. Collembolan communities as indicators of land use intensification. *Soil Biol. Biochem.* 35: 813–826.
- Porta Casanellas, J., López-Acevedo Reguerín, M., Roquero De Laburu, C., 1999. *Edafología: Para la agricultura y el medio ambiente*. 2da Edición. Mundi-Prensa. Madrid. 849 pp.
- Reca, L.G., 2006. El sector agropecuario argentino: despegue, caída y resurgimiento (1875 Y 2005). *Estud. Econ.* vol.23 n° 47.
- Römbke, J., Jänsch S., Didden, W., 2005. The use of earthworms in ecological soil classification and assessment concepts. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 62: 249-265.
- Sanchez, F.I. & Sanchez, S.C., 1982. Sobre la física del suelo y su importancia en el uso y conservación del mismo. Centro de edafología y biología aplicada de Salamanca, Vol VIII.
- Sarandón, S.J., Sarandón, R., 1993. Un enfoque ecológico para una agricultura sustentable En: Goin F y C Goñi (Eds.) *Bases para una política ambiental de la R. Argentina*, Sección III, 19:279-286, HC Diputados de la Pcia. de Buenos Aires.
- Satorre, E., 2003. Los caminos de la sustentabilidad. *Revista de los CREA*, 273: 52-56.
- Satorre, E., 2005. Cambios tecnológicos en la agricultura argentina actual. *Ciencia Hoy* 15: 24-31.
- Scherr, S.J., 1999. Soil Degradation. A threat to developing – country food security by 2020. International food policy research institute – IFPRI. Washington. USA.
- Sousa, J.P., Bolger, T., da Gama, M.M., Lukkari, T., Ponge, J.F., Simon, C., Traser, G., Vanbergen, A.J., Brennan, A., Dubs, F., Ivtis, E., Keating, A., Stofer, S., Watt, A.D., 2006. Changes in Collembola richness and diversity along a gradient of land-use intensity: A pan European study. *Pedobiologia* 50: 147–156
- Stork, N.E., 1995. Measuring and monitoring arthropod diversity in temperate and tropical forests. In: Boyle, T.J.B., Boontawee, B. (Eds.), *Measuring and Monitoring Biodiversity in Tropical and Temperate Forests*. Center for International Forestry Research, Bogor, pp. 257–270.

- Swift, M.J., Bignell, D.E., Moreira, F.M.S., Huising, E.J., 2012. El inventario de la biodiversidad biológica del suelo: conceptos y guía general. En: Manual de biología de suelos tropicales. Muestreo y caracterización de la biodiversidad bajo suelo. Instituto Nacional de Ecología Ed. Moreira, F., E. J. Huising y D. E. Bignell. México, 337 pp., México.
- Taboada, M. A., Damiano, F., Lavado, R.S., 2009. Inundaciones en la región pampeana. Consecuencias sobre los suelos. p.103-127. En: M. A. Taboada y R. S. Lavado (ed). Alteraciones de la fertilidad de los suelos. Editorial Facultad de Agronomía Universidad de Buenos Aires.
- Tilman, D., Fargione, J.F., Wolff, B.W., D'antonio, C., Dobson, A.D., Howarth, R., Schindler, D., Schlesinger, W. H., Simberloff, D., Swackhamer, D., 2001. Forecasting agricultural driven global environmental change. *Science* 292: 281-284.
- Trigo, E, 2016. Veinte años de cultivos genéticamente modificados en la Agricultura Argentina. AgeBio, Consejo argentino para la información y desarrollo de la Biotecnología.
http://argenbio.org/adc/uploads/20GM_2016/Informe_20GM_web.pdf
- Van Straalen, N.M., 1998. Evaluation of bioindicator system derived from soil arthropod communities. *Appl. Soil Ecol.* 9:429.
- Vedder, B., Kampichler, C., Bachmann, G., Bruchner, A., Kandeler, E., 1996. Impact of faunal complexity on microbial biomass and N turnover in field mesocosms from a spruce forest soil. *Biol Fertil Soils* 22: 22-30.
- Viglizzo, E.F., 1986. Agroecosystems stability in the Argentina Pampas. *Agric. Ecosyst. Environ.* 16, 1-12.
- Viglizzo, E.F., Roberto, Z., 1998. On trade-offs in low-input agro-ecosystems. *Agricultural Systems* 56, 253-264.
- Waggoner, P.E., 1995. How much land can ten billion people spare for nature? Does technology make a difference? *Technology in Society* 17: 17-34.
- Yeates, G.W., Bongers, T., 1999. Nematode diversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 74:113-135.
- Zak, D.R., Holmes, W.E., White, D.C., Peacock, A.D., Tilman, D., 2003. Plant diversity, soil microbial communities, and ecosystem function: are there any links? *Ecology* 84: 2042-2050.

Zizumbo Villarreal, D., Colunga-García Marín, P., 2008. El origen de la agricultura, la domesticación de plantas y el establecimiento de corredores biológico-culturales en Mesoamérica. *Revista de Geografía Agrícola*, N° 41, pp. 85-113 Universidad Autónoma Chapingo México.

CAPÍTULO II

ÁREA DE ESTUDIO Y DISEÑO EXPERIMENTAL

ÁREA DE ESTUDIO

Generalidades

El área donde se llevaron a cabo los estudios correspondientes a esta tesis, se encuentra dentro de la región de la Llanura Pampeana (Pampa Humeda) (Fig. 2.1), la cual es una amplia planicie con más de 54 millones de hectáreas de tierras útiles para la ganadería y la agricultura, ya que cuenta con excelentes condiciones edáficas y climáticas, características de suma importancia para estas actividades (Viglizzo et al., 2004).

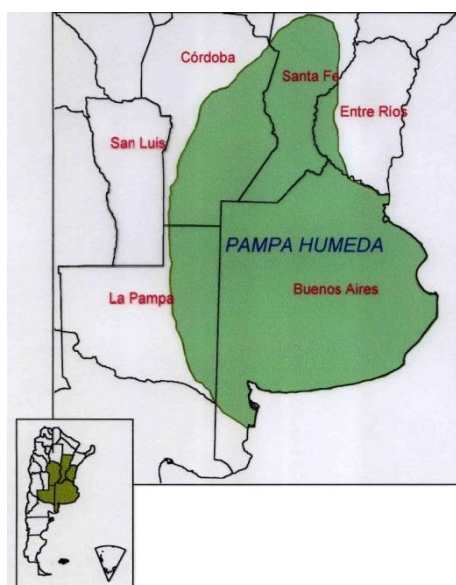


Fig. 2.1: Mapa de la ubicación de la Llanura Pampeana. Provincias que la componen: parte de La Pampa, Córdoba, Santa Fe, Entre Ríos y prov. de Buenos Aires. Fuente: <http://imgsearcher.ru/leyendas-de-la-region-pampeana.html>.

Fitogeográficamente se ubica en la región Neotropical, dominio Chaqueño, distrito Oriental de la provincia Pampeana y por lo tanto la vegetación dominante es la estepa o pseudoestepa de gramíneas (Cabrerá y Willink, 1973).

La modificación de la cobertura original de vegetación, producto de actividades productivas, es casi completa. La vegetación original corresponde a praderas o pseudoestepas y las comunidades más representativas las conforman distintos tipos

de flechillares que incluyen distintas especies del género *Stipa* (*Stipa neesiana*, *S. hyalina*, *S. papposa* y *Bothriochloa laguroides*) (Lewis et al., 1985). A su vez, otras especies de la vegetación original del territorio, tales como el ceibo y el sauce, sólo crecen en las zonas ribereñas, y otras especies, como el quebradillo, el calderón y la jarilla, se encuentran en las regiones de estepa.

Las condiciones edáficas y climáticas permiten desarrollar dos cultivos en la misma estación de crecimiento en gran parte del área, dándole a esta subregión un carácter eminentemente agrícola. Son suelos caracterizados por su alto contenido de materia orgánica, pH levemente ácido, textura superficial franca, franco-arcillosa o franco-arenosa, y un material madre (loess) rico tanto en bases (Ca, Mg y sobre todo en K), como en otros nutrientes. El clima de la región es templado húmedo, presentando una precipitación anual media de 1000 mm con gradiente decreciente hacia el oeste, y una temperatura media anual de 17 °C.

Las áreas utilizadas para la ganadería se encuentran mayormente adyacentes a los cursos de agua y en zonas cóncavas muchas veces anegables. Con la intensa presión que la agricultura y la ganadería han ejercido sobre la vegetación nativa, se han producido grandes cambios en la cobertura del suelo, así como en la estructura y la composición de los remanentes de pastizales (Viglizzo et al., 1997). Como consecuencia de esta intensificación se incrementó el deterioro de los suelos agravado por el desbalance entre la extracción de nutrientes y su reposición (García y Darwich, 2009; Pengue, W., 2009). Así, se originaron degradaciones edáficas por erosión hídrica y eólica, pérdida de capacidad de almacenaje de agua y pérdida de nutrientes, incremento en el consumo de energía fósil, contaminación con pesticidas, disminución del carbono intercambiable e intervención del hábitat (Pengue, W., 1998, 2004). El reemplazo de las rotaciones agrícola-ganaderas (cereales y leguminosas) por la agricultura continua, produce una pérdida promedio de suelo de 28 tn/ha/año (Di Pace et al., 1992) y disminuye significativamente la incorporación de materia orgánica al suelo (Casas, R.R., 2005). Hasta mediados de la década de los 80', los niveles de materia orgánica en la capa arable del suelo cayeron aproximadamente al 50%;

mientras el uso de fertilizantes minerales era bajo: 13 kg/ha cultivada, y se concentraba en papa, trigo, maíz y pasturas (García y Darwich, 2009).

Sitios de muestreo

Los campos donde se realizaron todos los muestreos se encuentran en los partidos de Chivilcoy (60 m.s.m.) y Navarro (43 m.s.m.) de la provincia de Buenos Aires, Argentina (Fig. 2.2).



Fig. 2.2: Localización geográfica de los sitios de muestreo. (Sobre imágenes de Google™)

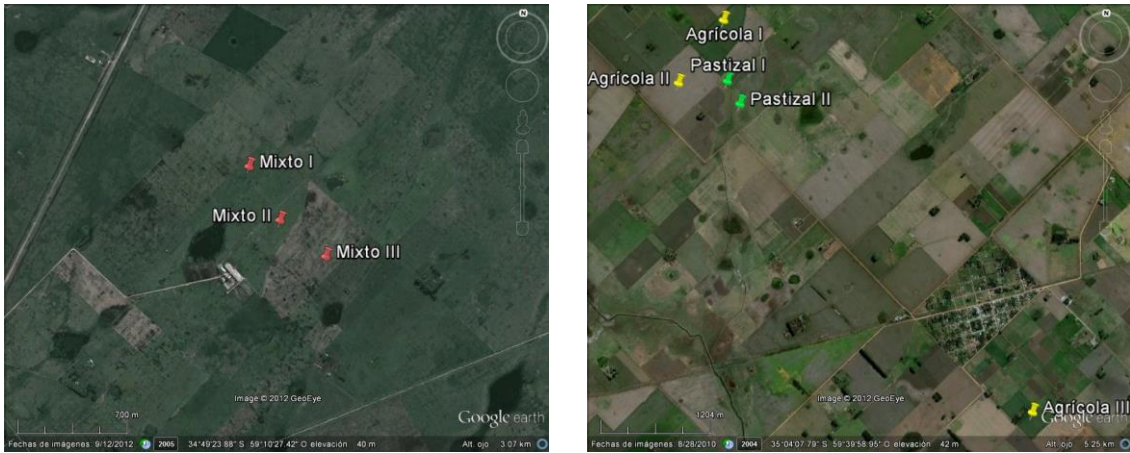


Fig. 2.3. Ubicación de los nueve lotes muestreados (Sobre imágenes de Google TM)

Tabla 2.1: Ubicación de los nueve lotes muestreados

	Latitud	Longitud
Pastizal 1	S 35° 03' 287''	w 59° 41' 036''
Pastizal 2	S 35° 03' 316''	W 59° 41' 033''
Pastizal 3	S 34° 51' 050''	W 60° 01' 740''
Mixto 1	S 34° 17' 171''	W 59° 10' 313''
Mixto 2	S 34° 49' 250''	W 59° 10' 257''
Mixto 3	S 34° 49' 302''	W 59° 10' 161''
Agrícola 1	S 35° 03' 202''	W 59° 41' 185''
Agrícola 2	S 35° 03' 155''	W 59° 41' 099''
Agrícola 3	S 35° 05' 220''	W 59° 38' 709''

Todos los campos agrícolas están dentro de un radio de no más de 5 Km entre sí, los campos mixtos se encuentran también a una distancia similar entre sí y dos de los tres pastizales están contiguos mientras que el tercero se encuentra a unos 37 Km. Estas distancias en la Pampa Húmeda son prácticamente irrelevantes en cuanto a clima o elevación y los suelos de todos los sitios muestreados corresponden a Argiudoles

Típicos (USDA Keys to Soil Taxonomy de 2014), series Henry Bell y Lobos (INTA, <http://anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/>).

Los datos de los lotes muestreados se obtuvieron mediante bibliografía y entrevistas con los dueños de los campos, los cuales brindaron información acerca de la historia de uso antes del inicio del estudio.

Tabla 2.2: Descripción física y química de los perfiles típicos de estas series

	Serie Henry Bell	Serie Lobos
Capacidad de uso	II w	II w
Limitaciones de uso	Drenaje, encharcamiento excepcionales, napa freática a 1.80 m	Drenaje, encharcamiento temporarios ocasionales
Drenaje y permeabilidad	Algo pobremente drenado, escurrimiento lento, permeabilidad lenta.	Moderadamente bien drenado, escurrimiento lento, permeabilidad moderada a moderadamente lenta.
Horizontes	Ap (0-24 cm; pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo; franco limoso; granular, fino y débil; duro; muy friable; no plástico; no adhesivo; raíces abundantes; límite inferior claro e irregular)	Ap (0-18 cm; pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo; franco limoso; granular fina, débil; friable; no plástico, no adhesivo; raíces abundantes; límite inferior claro, suave)
Profundidad (cm)	0-24	0-18
Mat. orgánica (%)	3,55	4,76
Carbono total (%)	2,06	2,76
Nitrógeno (%)	0,226	0,280
Relación C/N	9	10
Arcilla < 2 μ (%)	21,0	22,6
Limo 2-20 μ (%)	21,0	20,5
Limo 2-50 μ (%)	62,9	51,8
Humedad (%)	28,7	27,6
pH H₂O 1:2,5	5,7	6,1
Ca⁺⁺ m.eq./100gr	13,2	22,4
Mg⁺⁺ m.eq./100gr	1,5	2,6
Na⁺ m.eq./100gr	0,1	0,2
K m.eq./100gr	2,3	2,3

Los sitios de muestreo fueron campos con tres diferentes intensidades de uso de suelo:

- 1) Pastizales naturalizados (PN), pastizales abandonados sin influencia antrópica directa significativa por al menos 50 años. Son campos cuya vegetación

predominante es *Festuca pratensis*, *Stipa* spp, Cardo negro (*Cirsium vulgare*) y duraznillo (*Solanum laucophyllum*).



Fotografías de los campos de muestreo del Pastizal Naturalizado. Foto 1: Mayo 2009, Foto 2: Diciembre 2009, Foto 3: Junio 2010.

2) Sistema mixto (SM) con 25 años bajo pastoreo continuo con alta carga animal y dos años antes de comenzar este estudio (2007), rotó a la producción de pasturas (fardos de avena, maíz y sorgo) para feedlot. El cambio en el sistema de producción involucró el uso de equipamiento (subsolador) el cual trabaja a mayor profundidad en el perfil del suelo, con el objetivo de descompactar el mismo. Se utiliza siembra directa, ya que la zona no permite otro método por el escaso drenaje. Se aplican herbicidas (glifosato, dicamba para hoja ancha y 2,4 D) y fertilizantes (fosfato de amonio y urea).

En estos campos se realizan prácticas de conservación, tales como el respetar las rotaciones e incorporar los restos de cosecha al suelo. Esta incorporación aporta materia orgánica e incide directamente sobre la estructura del suelo y su estabilidad e indirectamente a través de la incorporación de alimento para la biota edáfica y así, sobre el ciclado de nutrientes. En todos los campos, se hizo algo de movimiento de

suelos: varios canales, se diseñaron y armaron lotes, se taparon pozos de caminos de ganado, etc. En algún momento se hicieron rollos de rastrojos, pero se decidió no realizar más esta práctica, porque se prefiere incorporarlo para darle estructura al suelo (Datos proporcionados por el propietario).



Fotografías de los campos de muestreo del Sistema Mixto. Foto 1: Mayo 2009, cultivo de sorgo; Foto 2: Marzo 2010, cultivo de soja; Foto 3: Septiembre 2010, rastrojo de maíz.

- 3) Sistema agrícola (SA), bajo agricultura intensiva continúa por 50 años y bajo siembra directa durante los 18 años anteriores al inicio de los muestreos. La principal rotación utilizada es maíz-trigo-soja, con siembra directa, control químico de las malezas y se caracteriza por un alto volumen de residuos de cosecha de superficie. Durante la temporada de cultivo, se utiliza maquinaria pesada y se realizan aplicaciones de insecticidas, herbicidas y fertilizantes. Primero se aplican herbicidas para hacer control de malezas, luego se siembra (siembra directa), a veces se realiza otra aplicación de herbicida y/o insecticida según necesidad y luego se cosecha.

Se utiliza soja transgénica y maíz bt para barrenador, se realiza fertilización en línea e inoculación, es decir, se aplica la tecnología normal para la siembra directa, buscando los mejores rindes. La soja se fertiliza al inicio del ciclo con mezcla de fertilizantes que contienen fósforo, nitrógeno, calcio y azufre. En soja y maíz y a veces en el trigo se fertiliza en la siembra, y en el macollaje a veces se hace una aplicación de urea para aporte adicional de nitrógeno.



Fotografías de los campos de muestreo del Sistema Agrícola. Foto 1: Mayo 2009 post cosecha de maíz; Foto 2: Marzo 2010 cultivo de soja; Foto 3: Diciembre 2010, cultivo de maíz.

DISEÑO EXPERIMENTAL

Por cada sistema de uso de suelo, 3 diferentes sitios en potreros separados fueron seleccionados como réplicas y en cada réplica 3 muestras al azar fueron tomadas por sitio y por fecha de muestreo. Los muestreos se realizaron estacionalmente a lo largo de 2 años (2009 y 2010) (Tabla 2.3).

Una situación para tener en cuenta, es que durante los primeros 8 meses del año 2009 hubo una fuerte sequía (la cual fue continuación de la producida durante el año 2008, (Fig. 2.4)), mientras que ya a fines de este año y principios del 2010 las lluvias se incrementaron hasta llegar un máximo de 300 mm durante el mes de febrero, y luego volvieron a disminuir durante el resto del año 2010.

El promedio de lluvias mensuales durante el período de muestreos fueron:

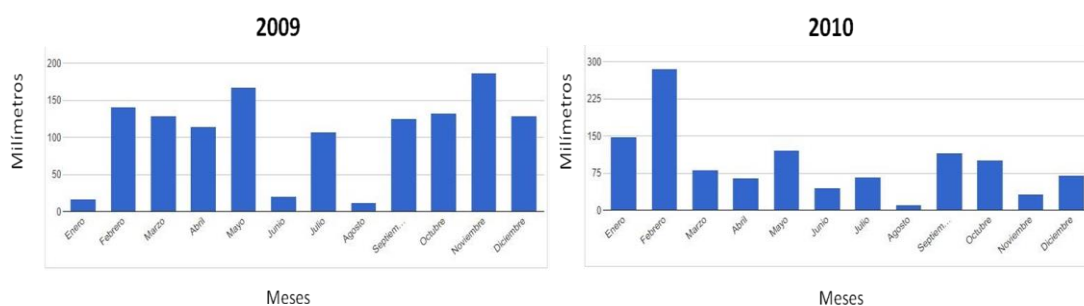


Fig. 2.4: Promedio de lluvias mensuales durante los años 2009 y 2010.

Tabla 2.3: Diseño experimental

Sistema	Sitios (Réplicas)	Muestras	Muestreos	Total
Pastizal Naturalizado (PN)	Pastizal 1	3 muestras por réplica por fecha de muestreo	8 (estacionales a lo largo de 2 años)	72
	Pastizal 2			
	Pastizal 3			
Sistema Mixto (SM)	Mixto 1	3 muestras por réplica por fecha de muestreo	8 (estacionales a lo largo de 2 años)	72
	Mixto 2			
	Mixto 3			
Sistema Agrícola (SA)	Agrícola 1	3 muestras por réplica por fecha de muestreo	8 (estacionales a lo largo de 2 años)	72
	Agrícola 2			
	Agrícola 3			
				216

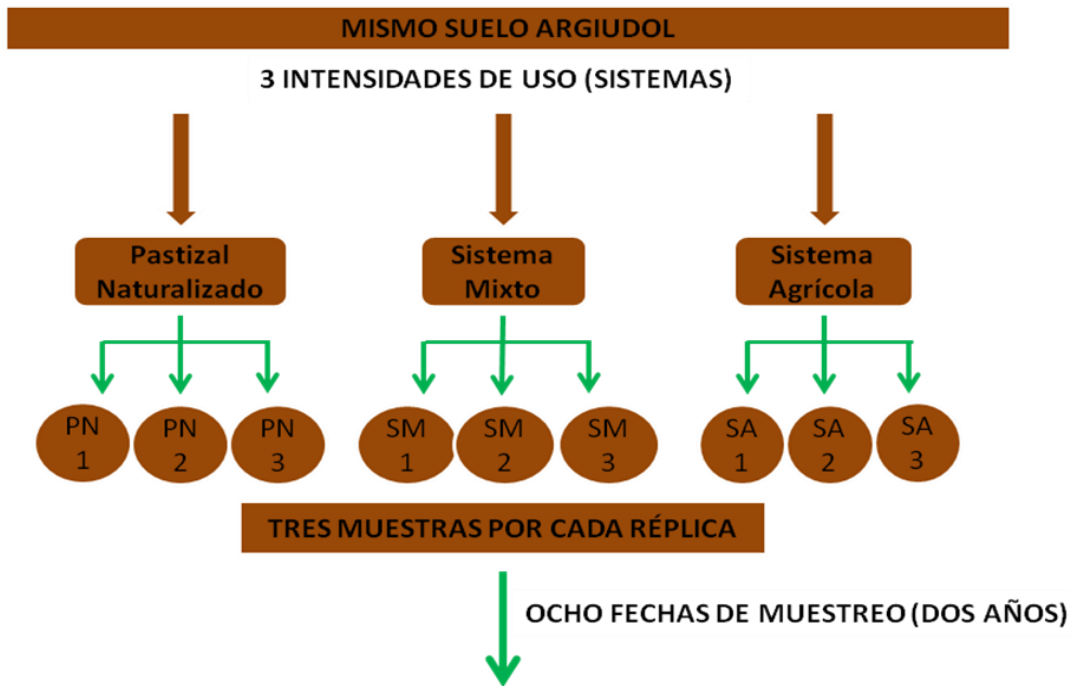


Fig. 2.5: Esquema del diseño de muestreo.

Las muestras fueron tomadas seleccionando los puntos muestreados de manera aleatoria. En cada punto de muestreo se procedió a medir en campo utilizando un penetrómetro, la resistencia mecánica (RM) de 0 a 5 cm y de 5 a 10 cm. de profundidad. Por medio de un sacabocado se extrajo la muestra necesaria para, luego en el laboratorio, realizar el cálculo de la densidad aparente (DAP) y la humedad.

A su vez, en el mismo punto se tomó un monolito de suelo de 25 x 25 cm y 25 cm de profundidad del cual se extrajeron las lombrices de manera manual; y se tomó una sub muestra de 0,5 dm³ de suelo, la cual se llevó al laboratorio para realizar las determinaciones de conductividad eléctrica (CE), pH, contenido de materia orgánica (MO), contenido de Fósforo (P), Nitrógeno total (N) y de los cationes: Sodio (Na), Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y Potasio (K). Una porción de esta muestra se refrigeró para el análisis de las variables microbiológicas: Actividad nitrogenasa (ARA) y Respiración.

Para el muestreo de la mesofauna se extrajo, también del mismo punto, una muestra de suelo de 150 cm³, la cual se llevó al laboratorio para el procedimiento de extracción de los organismos y su posterior determinación.

Este procedimiento se realizó durante las ocho fechas de muestreo, en cada una de las tres réplicas de cada una de los tres sistemas de uso.

En la tabla 2.4 se detallan las variables analizadas y se nombran los métodos de determinación utilizados para cada variable, los cuales se detallan con mayor precisión en el Anexo I.

Tabla 2.4: Variables analizadas y sus métodos

Físicas	Químicas	Microbiológicas	Biológicas
Densidad aparente (Porta)	pH (potenciometría)	Actividad Nitrogenasa (ARA)	Familias de Colémbolos (método de flotación)
Resistencia mecánica (Cono)	Nitrógeno (Kjeldahl)	Respiración (Incubación)	Superfamilias de Ácaros (método de flotación)
Conductividad eléctrica (conductímetro)	Fósforo (Kurtz y Bray)		Especies de Lombrices (método manual)
Humedad	Materia Orgánica (Walkey-Black)		
	Ca (titulación con EDTA)		
	Mg (titulación con EDTA)		
	Na (fotometría de llama)		
	K (fotometría de llama)		

BIBLIOGRAFÍA

- Cabrera, A., Willink, A., 1973. Biogeografía de América Latina. Serie de Biología. Monografía No.13. Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico. Departamento de Asuntos Científicos. Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos, Washington.
- Casas, R.R., 2005. Efecto de la intensificación agrícola sobre los suelos. Ciencia Hoy; Vol. XV. N° 87, Junio – Julio. pp. 42-43.
- Di Pace, M., Federovisky, S., Hardoy, J., Mazzucchelli, S., 1992. Medio ambiente urbano en la Argentina. Colección los fundamentos de las Ciencias del Hombre. Buenos Aires, CEAL. Centro Editor de América Latina. 101 p áginas.
- García, F.O., Darwich, N., 2009. La fertilización: tecnología para sostener la producción de nuestros suelos. En: La Argentina 2050. La Revolución Tecnológica del Agro. Ricci, D. (Editora). 744 p.
- INTA. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Carta de suelos: <http://geointa.inta.gov.ar/SIGPPMM/>. Last accessed, August 11, 2011.
- Lewis, J.P., Collantes, M.B., Pire, E.F., Carnevale, N.J., Boccanelli, S.I., Stofella, S.L., Prado, D.E., 1985. Floristic groups and plant communities of southeastern Santa Fe, Argentina. Vegetatio 60: 67-90.
- Pengue, W. A., 1998. “Transgenic Soybean, No Tillage and Integrated Pest Management: Technological and Environmental Changing”. Paper N° 981038. American Society of Agricultural Engineers. ASAE.
- Pengue, W.A., 2004. Environmental and socio economic impacts of transgenic crops in Argentina and South America: An ecological economics approach. En: B. Breckling y R. Verhoeven (eds.) Risk Hazard Damage. Specification of Criteria to Assess Environmental Impact of Genetically Modified Organisms. Federal Agency for Nature Conservation. Bonn.
- Pengue, W.A., 2009. Agrofuels and Agrifoods: Counting the Externalities at the Major Crossroads of the 21st Century. Bulletin of Science Technology Society, BSTS; 29; 167.
- USDA Keys to Soil Taxonomy, 2014. 12 th Edition.
- Viglizzo, E.F., Roberto, Z.E., Lértora, F., López Gay, E., Bernardos, J., 1997. Climate and land-use change in field-crop ecosystems of Argentina. Agriculture, Ecosystems and Environment 66: 61-70.

Viglizzo, E.F., Pordomingo, A.J., Castro, M.G., Lértora, F.A., Bernardos, J.N., 2004. Scale-dependent controls on ecological functions in agroecosystems of Argentina. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 101: 39–51.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DE LOS SUELOS

INTRODUCCIÓN

El suelo es un sistema dinámico, un sistema vivo con numerosos componentes de tipo físico, químico y biológico, en cuyo interior todos los detalles de su composición afectan y son afectados por el entorno y en el cual todos los componentes interactúan y mantienen un equilibrio dinámico (White, R.E., 2006).

Así el suelo se considera un recurso viviente y dinámico cuyo estado es vital tanto para el funcionamiento de los ecosistemas en general, como para la producción agrícola. Dado el papel regulador que el suelo ejerce como parte de los ciclos biogeoquímicos y de nutrientes, como regulador de la disponibilidad y calidad de agua y por su rol en la filtración y descomposición de agentes contaminantes, el suelo es un recurso natural clave para nuestra supervivencia (Barrios et al., 2000).

La composición química y la estructura física del suelo de un lugar dado están determinadas por el tipo de material geológico del que se origina, por la cubierta vegetal, por la cantidad de tiempo en que ha actuado la meteorización, por la topografía, por los cambios artificiales resultantes de las actividades humanas y por la interacción de estos factores con la biota del suelo (White, R.E., 2006).

Las características físico-químicas del suelo son de suma importancia, desde un punto de vista ambiental para la mantención de los servicios ecosistémicos, y desde un punto de vista agronómico para el desarrollo de los cultivos y la cantidad y calidad de las cosechas, ya que están en relación directa con los nutrientes y las características de los suelos (Sanchez y Sanchez, 1982). En relación a este último punto de vista, la fertilidad física está definida por todas aquellas características relacionadas con la estructura del suelo y la resistencia que el suelo ofrece a la penetración de raíces y emergencia de plantas. La fertilidad química está definida por la disponibilidad de nutrientes (Gomero y Velázquez, 1999).

El rendimiento de un cultivo es afectado por diversos factores, entre los que ocupa un lugar importante la disponibilidad de los nutrientes esenciales para las plantas en el suelo. Cuando estos nutrientes no están en cantidades adecuadas, hay necesidad de adicionar fertilizantes químicos o enmiendas para suplir las necesidades y corregir condiciones adversas. Desde este punto de vista, el análisis químico del suelo puede suministrar información muy valiosa (Gomero y Velázquez, 1999).

En Argentina, y principalmente dentro de la Región Pampeana, la producción agrícola se ha realizado durante casi un siglo aprovechando la fertilidad natural de sus tierras. En efecto, los suelos predominantes son de una alta fertilidad, tanto por sus propiedades químicas, como por sus características físicas, lo que favorece el establecimiento y el crecimiento de los cultivos. Esta fertilidad es debida a un alto contenido original de materia orgánica, un pH levemente ácido, una textura superficial franca o franca arenosa y a un material madre (loess) rico tanto en bases (calcio, magnesio y potasio) así como algunos otros nutrientes. Entre estas características, la materia orgánica juega un rol relevante, tanto por su contenido de nutrientes (principalmente nitrógeno, fósforo y azufre potencialmente disponibles para las plantas), como por sus efectos sobre la disponibilidad de los micronutrientes (boro, zinc, cobre, entre otros), sobre las propiedades físicas y la actividad biológica del suelo (Berardo, A., 2004).

Para evaluar estas propiedades se utilizan indicadores que según USDA (Departamento de Agricultura de Estados Unidos) son clasificados en cuatro categorías: indicadores visuales, físicos, químicos y biológicos (Martinez-Salgado et al., 2010).

- Los indicadores visuales pueden ser obtenidos por observaciones de los campos, percepción de los agricultores, y conocimientos de los pobladores locales.
- Los indicadores físicos están relacionados con la organización de las partículas y los poros del suelo, y reflejan efectos en el crecimiento de raíces, velocidad de emergencia

de las plantas, e infiltración de agua; e incluyen densidad aparente, resistencia mecánica, estabilidad de agregados, porosidad, textura, compactación.

- Los indicadores químicos incluyen pH, conductividad eléctrica, contenido de materia orgánica, contenido de nutrientes (ej. N, P), de cationes (ej. K, Na, Mg, Ca), humedad. Estos indicadores determinan la presencia de nutrientes y agua disponibles para las plantas y otros organismos.
- Por último, los indicadores biológicos incluyen mediciones de micro, meso y macro organismos, sus actividades y funciones. También incluyen procesos metabólicos tales como la respiración, así como productos metabólicos y compuestos químicos de organismos, particularmente enzimas.

OBJETIVOS

- 1) Caracterizar los tres sistemas de uso de suelo seleccionados desde el punto de vista físico-químico y determinar cuáles son las variables físicas y químicas que diferencian los distintos usos.
- 2) Seleccionar el set mínimo de datos (SMD) de las variables físico – químicas con el que se va a trabajar para el desarrollo de los índices biológicos.

DISEÑO DE MUESTREO

Los muestreos se realizaron estacionalmente de Marzo de 2009 a Diciembre de 2010, con el diseño explicado en el Capítulo anterior. Para cada uno de los tres sistemas de uso suelo se identificaron tres sitios (réplicas). En cada una de las ocho fechas de muestreo, se tomaron tres muestras de cada réplica. El número total de muestras fue en consecuencia de: 3 muestras x 3 sistemas de uso x 3 réplicas x 8 fechas = 216 muestras físico-químicas.

Las muestras para la caracterización física y química de los suelos de cada sistema de uso, se tomaron en las mismas fechas y en los mismos puntos de donde se

tomaron las muestras biológicas. Las descripciones detalladas de los métodos de determinación de todas las variables se explican en el Anexo I.

VARIABLES FÍSICO-QUÍMICAS MEDIDAS

Variables físicas:

Las variables del estado físico del suelo que se midieron fueron la densidad aparente y la resistencia mecánica.

Densidad aparente (Dap)

El suelo, es un sistema de tres fases: sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida, cuya proporción oscila entre 45 y 65 %, es la fracción cuyo volumen se modifica lentamente, mientras que los volúmenes ocupados por las fases líquidas y gaseosas son muy variables en el tiempo.

Las partículas de la fase sólida están distribuidas de forma tal que dejan espacios vacíos denominados poros, los cuales son en alta proporción considerablemente pequeños en cuanto a tamaño (del orden de μm). La sumatoria de los mismos constituye la porosidad del suelo.

El suelo como todo cuerpo poroso tiene dos densidades. La densidad real (densidad media de sus partículas sólidas) y la densidad aparente (teniendo en cuenta el volumen de poros).

La densidad aparente es la relación existente entre la masa y el volumen de un suelo y refleja la proporción total de porosidad del mismo, siendo importante para su manejo al modular la circulación de agua y aire y es afectada por la posible ocurrencia de fenómenos de compactación.

A diferencia de la densidad real, la densidad aparente incluye el espacio poroso en su cálculo, pero no considera el agua contenida en los poros, pues ésta es variable, y el cálculo se realiza con suelo seco a 105 °C. La densidad aparente de los suelos cultivados varía generalmente entre 1,0 y 1,6 g/cm³. La variación es debida, en la mayoría de los casos a diferencias en el volumen total de poros. Como regla general se acepta que a texturas más finas les corresponde un volumen de poros más grande. Así, un suelo arcilloso tiene densidades que varían entre 1,0 y 1,3 g/cm³; un suelo arenoso, en cambio, tiene densidades aparentes de entre 1,2 y 1,6 g/cm³. En un mismo suelo la densidad aparente puede modificarse según los cambios que se produzcan en el volumen de poros.

Algunos factores que modifican la densidad aparente son por ejemplo, la compactación ya que disminuye el volumen de poros, incrementando por lo tanto, el peso por unidad de volumen; la pérdida de materia orgánica, ya que puede incrementar el peso del suelo de dos maneras, por un lado la materia orgánica es más liviana que la fracción mineral y por otro lado, su disminución se halla asociada con una reducción del volumen total de poros, pues trae como consecuencia una menor estructura de los agregados del suelo.

Tabla3.1: Rangos de densidad aparente

Dap (g/cm ³)	Clasificación
< 1,25	Desarrollo normal
1,25 - 1,40	Dificultal para el crecimiento
1,40 – 1,70	Reducción de rinde
> 1,70	Practicamente imposibilidad de crecimiento

Métodos de determinación: **Método del cilindro**



Foto 1: Saca bocado con el que se extrae el cilindro de suelo para el cálculo de la densidad aparente.
Foto 2: Extracción de la porción de suelo para el cálculo de la densidad aparente.

Resistencia mecánica

El efecto más importante de la compactación del suelo es el aumento de su resistencia a la penetración. Para su medición, se utiliza como medida la dificultad que presenta el suelo a la penetración por parte de las raíces. Se realiza midiendo la resistencia a la penetración por parte de un implemento mecánico cónico estandarizado, llamado comúnmente penetrómetro.

Las causas que pueden producir un aumento de esta variable son la compactación superficial, el humedecimiento brusco del suelo, el golpeteo de las gotas de lluvia o el riego por aspersión.

Tabla 3.2: Rangos de resistencia mecánica

RM (Kg/cm ²)	Clasificación
< 10	Baja
10 – 20	Moderada
20 – 40	Alta
40 – 80	Muy alta
> 80	Extremadamente alta

Fuente: USDA (1993)

Método de determinación: penetrómetro



Foto 1: Penetrómetro con el cual se mide la resistencia mecánica. **Foto 2:** Medición de la resistencia mecánica.

Variables químicas:

Las variables del estado químico del suelo que se midieron fueron: humedad, conductividad eléctrica (CE), pH, contenido de materia orgánica (MO), contenido de Fósforo (P), Nitrógeno total (N) y de los cationes: Sodio (Na), Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y Potasio (K).

De un monolito de suelo de 25 x 25 cm y 25 cm de profundidad se tomó una muestra de 500 cm³. La misma se refrigeró y se llevó al laboratorio para la realización de las determinaciones.

Una vez en el laboratorio, las muestras de suelo se secaron al aire y se pasaron por tamices de 1 y 0,5 mm, previo a las mediciones.

Humedad del suelo

La humedad del suelo es el agua contenida en sus espacios porosos. Se dice que un suelo está saturado cuando todos sus poros están llenos de agua. Si se permite que un suelo saturado drene libremente por gravitación, en este estado se dice que el suelo está a capacidad de campo (c.c). Esta situación es muy favorable para el desarrollo de los cultivos, que encuentra en el suelo agua abundante retenida con una energía que es fácilmente superada por la de succión de las raíces, al mismo tiempo que el suelo está lo suficientemente aireado como para permitir la respiración radicular.

El contenido de agua puede descender por debajo de la capacidad de campo como consecuencia de la evaporación y la transpiración de las plantas. La película que rodea a las partículas se hace cada vez más fina y a medida que el contenido de agua disminuye, se hace más difícil la absorción de agua por las raíces. La presión negativa ejercida a través de las raíces para la obtención de agua crece hasta que alcanza un estado denominado punto de marchitez (P.m.), que se caracteriza porque las plantas absorben el agua del suelo con mucha dificultad y experimentan marchitez que puede resultar irreversible.

La capacidad de campo y el punto de marchitez determinan los límites máximo y mínimo de la humedad del suelo que puede ser utilizada por un cultivo en particular. La cantidad de agua comprendida entre estos dos valores se define como agua útil (humedad disponible).

Tabla 3.3: Rangos de humedad

H (%)	Clasificación
< 0,09	Punto de marchitez
0,09 – 0,12	Humedad optima
0,12 – 0,16	
0,16 – 0,23	
> 0,23	Capacidad de campo

Adaptado de Israelsen y Hansen, 1979

Método de determinación: **Diferencia de peso**

Conductividad eléctrica (CE)

La CE es una medida de expresión de la concentración de iones y de ella se pueden conocer potenciales efectos de la salinidad sobre el cultivo. A su vez permite relacionar el potencial osmótico con la disponibilidad de agua e inferir los efectos que éste provoca sobre el balance nutricional de las plantas (Schoenholtz et al., 2000).

La acumulación de sales en los suelos proviene de los constituyentes ionizados de los minerales primarios, de la atmósfera, por translocación de zonas altas a zonas bajas del relieve y comúnmente por las aguas de riego, que en algunos casos llegan a depositar varias toneladas de sales por hectárea y por año. Este problema es tanto más grave en las zonas áridas y semiáridas puesto que en las húmedas la lluvia produce naturalmente el lavado del exceso de las sales del perfil.

Todos los suelos fértiles contienen por lo menos pequeñas cantidades de sales solubles. La acumulación de sales solubles en el suelo se atribuye principalmente a problemas de drenaje y a la acción de riegos continuados, seguidos de evaporación y sequía.

La medida de la CE del suelo y de las aguas de riego permite estimar en forma cuantitativa la cantidad de sales que contiene. El análisis de la CE en suelos se hace

para establecer si las sales solubles se encuentran en cantidades suficientes como para afectar la germinación normal de las semillas, el crecimiento de las plantas o la absorción de agua por parte de las mismas.

Entre los iones que aparecen como sales en el suelo pueden mencionarse: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , HCO_3^- , $\text{SO}_4^{=}$ y también K^+ , $\text{CO}_3^{=}$ y BO_3^{3-} , este último escaso pero tóxico.

Tabla 3.4: Rangos de conductividad eléctrica

CE (dS/m)	Clasificación
0 – 2	No salino. Efectos despreciables de salinidad.
2 – 4	Ligeramente salino. Leve acumulación salina, restricción para cultivos muy sensibles.
4 – 8	Moderadamente salino. Restricción para muchos cultivos.
8 – 16	Fuertemente salino. Solo los cultivos tolerantes rinden satisfactoriamente.
> 16	Muy fuertemente salino. Severas restricciones.

Tomado de: Laboratorio de salinidad de suelos USDA, Riverside, California.

Método de determinación: **conductímetro**

pH

Una de las características más importantes del suelo, es su reacción ácido-alcalina, debido a que los microorganismos y las plantas responden al medio químico que define la concentración de hidrogeniones, que genera un gradiente de acidez a alcalinidad.

El agua que circula a través de los poros del suelo no es químicamente pura, lleva disueltos cationes y aniones, solos o combinados que constituyen la solución del suelo. El pH de la solución del suelo es una de las propiedades químicas más relevantes ya que controla la movilidad de iones, la precipitación y disolución de minerales, las reacciones redox, el intercambio iónico, la actividad microbiana y la disponibilidad de nutrientes. La remoción de bases (calcio, magnesio, potasio) sin reposición de las

mismas, conlleva a una disminución en la saturación del complejo de intercambio y acidificación del suelo (Vázquez, M.E., 2005).

Desde el punto de vista agronómico, el pH influye en otras propiedades físicas y químicas del suelo:

- Propiedades físicas: los pH neutros son los mejores para las propiedades físicas de los suelos. A pH muy ácidos hay una intensa alteración de minerales y la estructura se vuelve inestable. En pH alcalino, la arcilla se dispersa, se pierde estructura y existen malas condiciones desde el punto de vista físico.
- Propiedades químicas y fertilidad: la asimilación de nutrientes del suelo está influenciada por el pH, ya que algunos nutrientes, como el fósforo por ejemplo, se pueden bloquear en determinadas condiciones de pH y no son asimilables para las plantas.

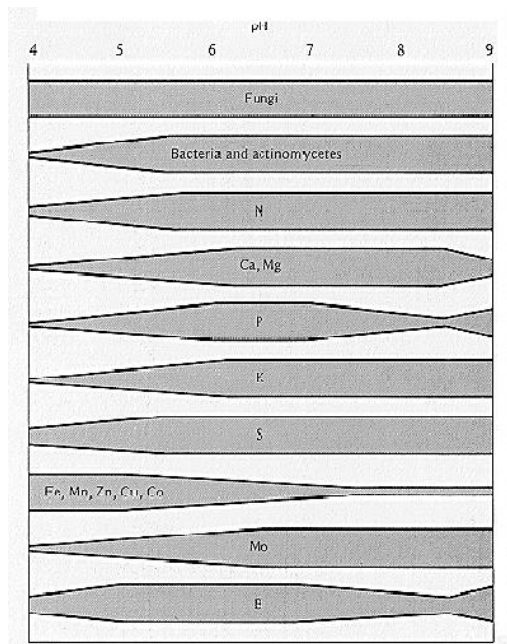


Fig. 3.1: pH óptimos para algunos organismos y para la asimilación de ciertos nutrientes Tomado de: N.C Brady 1994. The nature and Properties of soils.

La condición de acidez del suelo es común en todas las regiones donde la precipitación es lo suficientemente alta como para lixiviar las bases intercambiables de los niveles superiores del suelo, las que son reemplazadas por iones H^+ .

La alcalinidad se presenta cuando existe un alto grado de saturación de bases. Por presencia de Calcio, Magnesio, Sodio y Potasio adsorbidos al complejo de intercambio, sobre todo si está presente el Sodio en proporciones elevadas, pudiendo el pH llegar a valores de 9 a 10. También la presencia de formas de Carbonatos de Calcio y Magnesio puede definir la preponderancia de iones H^+ sobre los OH^- en la solución del suelo, bajo tales condiciones el suelo es alcalino.

Es importante establecer que en el pH del suelo influyen las cantidades relativas de las distintas clases de bases presentes en el complejo coloidal. Los suelos saturados de sodio tienen valores más altos de pH que los dominados por el Ca y Mg.

Tabla 3.5: Rangos de pH

pH	Clasificación	Observaciones
< 5.5	Fuertemente ácido	
5.5 – 6.5	Moderadamente ácido	
6.5 – 6.9	Levemente ácido	Máxima disponibilidad de nutrientes. Intervalo adecuado para la mayoría de los cultivos
7.0	Neutro	
7.1 – 7.5	Levemente alcalino	
7.5 – 8.5	Moderadamente alcalino	
> 8.5	Fuertemente alcalino	

Tomado de: <http://www2.inia.cl/medios/biblioteca/ta/NR23500.pdf>

Método de determinación: Método potenciométrico

Estos valores de pH son medidos en solución acuosa y puede considerarse el rango de 6,5 a 7,5 como óptimo para el desarrollo de las plantas, ya que es el intervalo de pH más adecuado para la asimilación de nutrientes por parte de las mismas.

Los microorganismos del suelo proliferan con valores de pH medios y altos. Su actividad se reduce con pH inferior a 5,5. $\text{pH} < 4,5$ es limitante para el crecimiento de las plantas y desfavorables para el crecimiento de muchas bacterias y hongos.

Materia orgánica (MO)

La materia orgánica es un indicador de la calidad del suelo, ya que incide directamente sobre las propiedades edáficas, tales como la estructura y disponibilidad de carbono y nitrógeno (Gregorich et al., 1984). Numerosos estudios coinciden en que la MO, es el principal indicador e indudablemente el que posee una influencia más significativa sobre la calidad del suelo y su productividad (Larson y Pierce, 1991; Doran y Parkin, 1994; Quiroga y Funaro, 2004).

Composición de la materia orgánica:

La materia orgánica en el suelo está formada por restos vegetales y animales en diverso estado de descomposición y los productos metabólicos de la fauna y microflora del suelo.

La mayor cantidad de aporte orgánico lo hace la vegetación. Los residuos de la actividad biológica son degradados hasta componentes elementales por mineralización. A su vez los productos resultantes se pueden reorganizar y polimerizar a través de nuevos procesos de re síntesis y formar los ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y huminas.

La descomposición de la materia orgánica en los suelos, está influenciada por una serie de factores internos y externos, entre los que se pueden citar principalmente:

- Factores internos:

Composición de los restos vegetales: teniendo en cuenta la relación C:N, son más fácilmente degradados los de baja relación C:N.

Cantidad de materia orgánica total presente en el suelo.

Relación lignina/celulosa: cuanto mayor es el tenor de lignina, más lenta es la mineralización.

- Factores externos:

Como la mineralización es un proceso primordialmente microbiológico, los factores que afectan a la cantidad y la actividad de los microorganismos, afectarán indirectamente la descomposición de la materia orgánica.

Temperatura: la mineralización se incrementa con la temperatura, ya que hay mayor actividad microbiológica.

Textura: en los suelos livianos, la descomposición es mayor que en los pesados debido a las mejores condiciones de aireación.

Aire y humedad: son complementarios, en suelos con saturación de agua, se produce la anaerobiosis y como la microflora que ataca la materia orgánica es esencialmente aeróbica (salvo algunos grupos anaeróbicos facultativos) la velocidad de descomposición de MO disminuye.

pH: las bacterias en su mayoría se desarrollan favorablemente en pH neutro a ligeramente alcalino, mientras que los hongos lo hacen en un rango más amplio.

Importancia agronómica

La materia orgánica es un atributo clave de la calidad del suelo, porque es la fuente principal de nutrientes, mejora las condiciones estructurales del suelo y promueve la actividad biológica (Masciandaro y Ceccanti, 1999).

La materia orgánica influye en las propiedades físicas, químicas y físico-químicas del suelo.

- En el aspecto físico, contribuye a dar estabilidad a la estructura y por lo tanto favorece buenas condiciones para el balance de aire y agua. Defiende los suelos contra la erosión porque evita la dispersión de las partículas minerales, tales como limos, arcilla y arenas.

Debido a su estructura molecular tiene en general una elevada capacidad de intercambio y confiere al suelo un buen poder regulador de pH.

- Químicamente es importante por el aporte de nutrientes especialmente N y P, ya que la mayor parte de estos elementos en el suelo, provienen de ella.

La materia orgánica del suelo es de composición sumamente heterogénea:

- Por sus diferencias de origen.
- Por diferencias en la forma en que se incorpora al suelo.
- Por las diferencias en las condiciones ecológicas internas entre distintos perfiles.

Tabla 3.6: Rangos de materia orgánica

% MO	Clasificación
> 4	Muy bien provisto
3 – 4	Bien provisto
1,7 – 3	Medianamente provisto
0,8 – 1,7	Pobremente provisto
< 0,8	Muy pobremente provisto

Fuente: Rioja Molina, A. (2.002), Apuntes de Fitotecnia General, E.U.I.T.A., Ciudad Real.

Método de determinación: **Método de Walkley-Black (modificado).**

Nutrientes

Fried y Broeshart (1967) transcriben la siguiente tabla:

Tabla 3.7: Composición cuantitativa de la solución del suelo, con datos expresados en milimoles/litro

ELEMENTO	RANGO TOTAL (milimoles/litro)	MEDIA SUELOS ÁCIDOS	MEDIA SUELOS CALCÁREOS
N	0,16 – 55	12,1	13
P	0,001 – 1	0,007	0,03
K	0,2 – 10	0,7	1
Ca	0,5 – 38	3,4	14
Mg	0,7 – 100	1,9	7
Na	0,4 – 150	1,0	29

Nitrógeno total (N)

El Nitrógeno es sumamente importante en el desarrollo de las plantas. Es el elemento químico principal para la formación de las proteínas.

El nitrógeno se encuentra en distintas formas en el suelo, es absorbido por las plantas y microorganismos como nitrato (NO_3^-) o amonio (NH_4^+), y puede encontrarse en muy diversos estados de oxidación y reducción.

El nitrógeno inorgánico está disponible para ser tomado por las plantas, mientras que el orgánico debe ser primero mineralizado (convertido a N inorgánico) antes de que las plantas lo puedan utilizar.

Las formas inorgánicas de nitrógeno son producidos a partir de la descomposición de la materia orgánica del suelo o de la adición de fertilizantes

nitrogenados. Los que se encuentran presentes en el suelo incluyen amonio (NH_4^+), nitrito (NO_2^-), nitrato (NO_3^-), óxido nitroso (N_2O), óxido nítrico (NO) y nitrógeno elemental (N_2), el cual es inerte excepto para aquellos microorganismos fijadores de nitrógeno (Follett, R.F., 2001). Para los vegetales, el N es necesario durante todo el ciclo de vida.

La mayor parte de la fijación del nitrógeno se lleva a cabo por bacterias que viven en el suelo.

Un exceso de nitrógeno produce un crecimiento exagerado de las partes verdes de la planta, pero puede enlentecer la floración y formación del fruto y puede hacer que las flores aborten. El exceso de nitrógeno también hace a la planta más susceptible a plagas, enfermedades, a la lluvia y al viento.

Un déficit de nitrógeno hace que las hojas sean más pequeñas y amarillentas por falta de clorofila (clorosis). Las nervaduras de la hoja también adquirirán ese tono amarillento. Las hojas antes de secarse se caen y la planta estará poco desarrollada en cuanto al crecimiento.

Tabla 3.8: Rangos de nitrógeno

% N	Clasificación
> 0,21	Muy bien provisto
0,13 – 0,21	Bien provisto
0,07 – 0,13	Medianamente provisto
0,04 – 0,07	Pobremente provisto
< 0,04	Muy pobremente provisto

Fuente: Rioja Molina, A. (2002), Apuntes de Fitotecnia General, E.U.I.T.A., Ciudad Real.

Método de determinación: **Kjeldahl**

Fósforo (P)

La importancia del Fósforo radica en su aporte al buen crecimiento de las plantas. Contribuye a la formación y maduración de los frutos, y es indispensable en la formación de semillas.

Además es importante para el desarrollo de las raíces y para el crecimiento de la planta joven. También contribuye a la maduración de la planta y a la formación de flores. El fósforo hace a la planta más resistente a las bajas temperaturas y a las enfermedades.

Un déficit de fósforo provoca un crecimiento pobre de la planta y tendrá pocas flores y frutos pequeños. En las hojas más viejas se podrán ver tonos púrpura y finalmente se secarán.

Un exceso de fósforo no parece que pueda causar daños para la planta, sin embargo puede influir en la asimilación de otros nutrientes.

Tabla 3.9: Rangos de fósforo

P (ppm)=mg P/Kg	Clasificación
< 5	Muy bajo
5 – 12	Bajo
12 – 18	Moderado
18 – 25	Alto
> 25	Muy alto

Fuente: Rioja Molina, A. (2002), Apuntes de Fitotecnia General, E.U.I.T.A., Ciudad Real.

Método de determinación: **Kurtz y Bray**

Potasio (K) y Sodio (Na)

El potasio (K) es uno de los "nutrientes esenciales", cumpliendo en las plantas dos acciones principales. Una de ellas es la de ser un elemento irremplazable en procesos metabólicos que incluyen la síntesis de las proteínas y la translocación de productos de la fotosíntesis. La otra acción, es la de ser el principal modulador de la presión osmótica, causa fundamental del mantenimiento de la turgencia celular vegetal. Esta segunda acción explica la gran cantidad de K que necesitan los cultivos (Conti, M., 2000). Es el segundo elemento en extracción por parte de los cultivos, después del nitrógeno, con valores que oscilan entre los 50 y 200 kg/ha según especies y rendimientos. También hace aumentar la resistencia de la planta a las enfermedades, a la sequía y al frío.

Un déficit de potasio hace que la planta crezca más pequeña y reduce la floración y formación de frutos de la planta. Las hojas se volverán amarillas desde los extremos hacia el centro, para luego secarse.

Un exceso de potasio puede hacer que la planta no asimile bien el magnesio, y por tanto presentar los síntomas de falta de magnesio.

El Na puede sustituir al K en ciertas funciones en las plantas (especialmente relacionadas a mantenimiento de la turgencia).

La mayor parte de los suelos no halomórficos (i.e. con alto contenido de sales) de la Argentina, presentan valores de estos elementos que pueden considerarse de aceptables a buenos.

Tabla 3.10: Rangos de potasio

K (cmol/Kg)	Clasificación
< 0,20	Muy bajo
0,20 – 0,50	Bajo
0,50 – 1	Moderado
1 – 2	Alto
> 2	Muy alto

Fuente: Rioja Molina, A. (2002), Apuntes de Fitotecnia General, E.U.I.T.A., Ciudad Real.

Tabla 3.11: Rangos de sodio

Na (cmol/Kg)	Clasificación
< 0,30	Muy bajo
0,30 – 0,60	Bajo
0,60 – 1	Moderado
1 – 2	Alto
> 2	Muy alto

Fuente: Rioja Molina, A. (2002), Apuntes de Fitotecnia General, E.U.I.T.A., Ciudad Real.

Método de determinación: **fotometría de llama.**

Calcio (Ca) y Magnesio (Mg)

El Ca desplaza al hidrógeno (H) presente en la superficie de las partículas de suelo, disminuyendo la acidez. Es esencial para los microorganismos que transforman los residuos de cultivos en materia orgánica, liberan nutrientes y mejoran tanto la estructura como la capacidad del suelo de almacenar agua. Además mejora la absorción de otros nutrientes por las raíces, así como su translocación en la planta.

La carencia de calcio hace que la planta sea más pequeña, aborto de las flores y que sus frutos puedan presentar pudriciones.

Un exceso de calcio puede influir en la asimilación del magnesio, por lo que la planta puede presentar síntomas de falta de magnesio.

El Mg contribuye en la síntesis de la clorofila y a regular el pH. También es importante en la floración. Es el elemento principal en la formación de clorofila, sin la cual la planta no puede formar azúcares.

Un déficit de magnesio hace que las hojas amarilleen, manteniendo sus nervios verdes.

Un exceso de magnesio hace que el potasio no sea bien absorbido por la planta.

Tabla 3.12: Rangos de calcio

Ca (cmol/Kg)	Clasificación
< 4	Muy bajo
4 – 10	Bajo
10 – 15	Moderado
15 – 20	Alto
> 20	Muy alto

Fuente: Rioja Molina, A. (2002), Apuntes de Fitotecnia General, E.U.I.T.A., Ciudad Real.

Tabla 3.13: Rangos de magnesio

Mg (cmol/Kg)	Clasificación
< 0,40	Muy bajo
0,40 – 1	Bajo
1 – 2	Moderado
2 – 4	Alto
> 4	Muy alto

Fuente: Rioja Molina, A. (2002), Apuntes de Fitotecnia General, E.U.I.T.A., Ciudad Real.

Método de determinación: **complejometría de EDTA**

CARACTERIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE USO DE SUELO

Análisis estadísticos

En función del **primero objetivo**: “Caracterizar los tres sistemas de uso de suelo desde el punto de vista físico-químico y determinar cuáles son las variables físicas y químicas que diferencian los distintos usos” se realizaron los siguientes análisis estadísticos:

- a) Test de Kruskal Wallis ($p < 0,05$). En función de la no normalidad de las variables medidas, se utilizó este test no paramétrico para comparar las variables entre los sistemas.
- b) Para analizar las diferencias entre los sistemas cuando se evalúan todas las variables en conjunto, se realizó un análisis de discriminante. Éste análisis permite describir las relaciones entre dos o más poblaciones (o grupos de observaciones multivariadas) de manera tal que las diferencias entre ellas se maximicen o se hagan más evidente.

Resultados y discusión

- a) Los resultados del Test de Kruskal Wallis se muestran en la Tabla 3.14 (promedios de las variables por sistema y sus diferencias).

De los resultados del análisis de cada variable se observa que:

La cantidad de MO no presenta diferencias significativas entre los sistemas y además los suelos analizados poseen valores entre medianamente bien a muy bien provistos.

Si bien para Sainz Rosas et al. (2011), los niveles más elevados de MO se encuentran en los pastizales naturales, y cuando estos sistemas son cultivados, se produce una rápida caída de la MO seguida de una declinación más lenta hasta un nuevo estado estable, en este estudio no se observó esta situación. Los campos

cultivados seleccionados para este análisis llevan un largo período dedicados a esta actividad, pero las prácticas que en ellos se realizan son de carácter conservacionista, dejando en la superficie una importante capa de rastrojos luego de la cosecha, haciendo de eso una buena provisión de materia orgánica para el suelo y sus comunidades, permitiendo que esta variable muy importante agrónomicamente se mantenga en sus niveles óptimos, además de mantener la humedad y temperatura óptima para la acción de la fauna edáfica. Como así también respetar la rotación (Maíz-Trigo-Soja) evitando el monocultivo de soja.

Algunos autores han verificado, además, que si bien el contenido de MO disminuye con los años de agricultura, no es la propiedad edáfica más sensible a las labranzas o a la intensificación del ciclo agrícola (Urricariet y Lavado, 1999). Además, según Ferreras et al. (2009) para detectar cambios en este parámetro como resultado de los sistemas productivos, se requieren de 5 a 10 años.

El contenido de materia orgánica, semejante entre diferentes sistemas productivos también puede explicarse porque los diferentes usos pueden cambiar la proporción entre la materia orgánica lábil y humificada pero no el contenido de materia orgánica total (Abril, A., 2004).

En el otro extremo las variables que presentan diferencias entre los tres sistemas son la RM tanto de 0-5 como de 5-10 cm de profundidad, la CE y los valores de Na.

Para la resistencia mecánica a la penetración, varios autores proponen diferentes valores críticos (VC) para el impedimento del desarrollo de las raíces, los cuales van de 8 a 50 Kg/cm² (Taylor y Gardne, 1966; Thomsa y Haszler, 1996; Vogel H., 1992).

Considerando el límite estricto de 8 Kg/cm² como el valor crítico (VC), el pastizal naturalizado tiene valores por encima del umbral en la superficie, el sistema agrícola alcanza el VC a los 10 cm de profundidad, mientras que el sistema mixto siempre presenta valores por debajo de este umbral.

Tabla 3.14: Variables físico químicas (media \pm DE) de muestras de suelo bajo tres intensidades de uso.

Variables	Sistemas		
	PN	SM	SA
P (ppm)	11 \pm 8,5 ac	15 \pm 12 bc	14 \pm 12 c
MO (%)	4 \pm 1,5 a	4 \pm 1,5 a	4 \pm 1,4 a
CE (dS/m)	1,5 \pm 1,3 a	0,8 \pm 0,5 b	0,7 \pm 0,5 c
pH	7,5 \pm 1 a	6 \pm 0,6 b	6 \pm 0,5 b
Densidad aparente (gr/cm ³)	1,2 \pm 0,2 a	1,1 \pm 0,1 b	1,2 \pm 0,1 a
H (%)	0,2 \pm 0,1 a	0,3 \pm 0,1 b	0,2 \pm 0,1 a
Ca (cmol/Kg suelo)	6,7 \pm 1,3 a	5 \pm 0,5 b	6 \pm 0,7 a
Mg (cmol/Kg suelo)	1,8 \pm 0,4 a	1,5 \pm 0,7 b	1,6 \pm 0,5 b
Na (cmol/Kg suelo)	1,3 \pm 0,5 a	0,8 \pm 0,2 b	0,7 \pm 0,2 c
K (cmol/Kg suelo)	1,6 \pm 0,5 a	1,3 \pm 0,3 b	1,6 \pm 0,5 a
N (%)	0,28 \pm 0,1 a	0,32 \pm 0,1 b	0,29 \pm 0,05 b
RM 0-5 (Kg/cm ²)	10 \pm 6 a	2,5 \pm 3 b	5,5 \pm 4 c
RM 5-10 (Kg/cm ²)	13 \pm 7 a	5 \pm 5 b	8 \pm 5 c

PN = Pastura Naturalizada; SM = Sistema Mixto; SA = Agricultura Intensiva. Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas entre sistemas para cada variable (K-W, $p < 0,05$).

Si bien son diferentes los valores de conductividad eléctrica entre los sistemas, ninguno de ellos presentó valores superiores a 4 dS/m indicado en la bibliografía como el umbral de salinidad. De hecho todos presentan valores < 2 dS/m.

Comparando los resultados obtenidos con los criterios usualmente utilizados por el INTA para la interpretación de los análisis de un suelo argiudol, todos los sistemas estudiados muestran muy altos niveles de K ($> 1,2$ cmol* Kg soil⁻¹) y N ($> 0,28\%$), y niveles moderados de Ca (> 5 cmol* Kg soil⁻¹), Mg ($> 1,5$ cmol* Kg soil⁻¹), Na ($> 0,7$ cmol* Kg soil⁻¹), y de P (> 11 ppm).

b) La fig. 3.2 muestra el resultado del análisis discriminante en el cual se puede ver que los sistemas se diferencian entre sí.

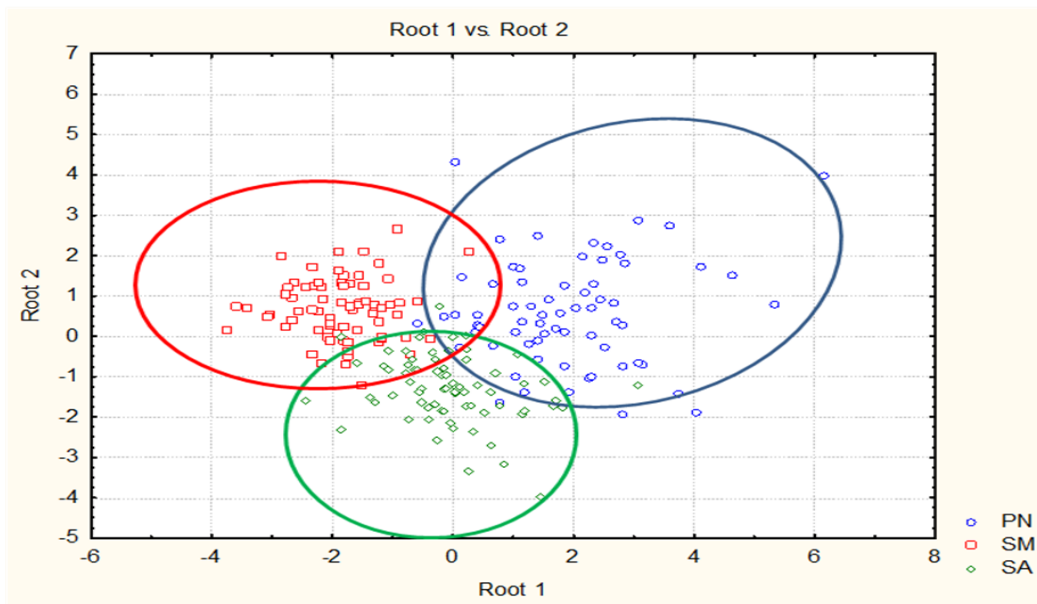


Fig. 3.2: Análisis discriminante mostrando la separación de los sistemas en base a las variables físico-químicas.

Comparando los sistemas entre sí, vemos que el pastizal naturalizado difiere significativamente con el sistema mixto en 11 de las 12 variables. Estas diferencias incluyen mayores valores de Ca, Mg, Na, K, pH, Ce, Dap y RM en el pastizal, mientras que el P, el N, y la H son mayores en el sistema mixto.

Cuando comparamos el pastizal naturalizado con el sistema agrícola vemos que este último presenta mayores valores de P y N, y menores de Mg, Na, Ce, pH y RM.

Por último, al comparar los sistemas antropizados entre sí, los resultados muestran que el sistema agrícola presenta mayores niveles de Ca, K, N y Dap, mientras que el sistema mixto tiene mayores valores de Na, H y CE.

SELECCIÓN DEL SET MÍNIMO DE DATOS

El **segundo objetivo** de este capítulo se refiere a: “Seleccionar el set mínimo de datos (SMD) de las variables físico – químicas con el que se va a trabajar para el

desarrollo de los índices biológicos.” Para esto, se siguió la metodología propuesta por Andrews et al. (2002) consistente en:

- 1) Se realiza el PCA con todas las variables ambientales medidas. El análisis de componentes principales es adecuado para encontrar componentes relevantes o patrones predominantes dentro de un conjunto de datos en múltiples dimensiones y poner de manifiesto tendencias desconocidas de los datos. Los componentes principales (PC) para un conjunto de datos se definen como combinaciones lineales de las variables que dan cuenta de máxima varianza dentro del conjunto mediante la descripción de vectores de más cercano a las n observaciones en el espacio $p -$ dimensional, sujeto a ser ortogonales entre sí. El sistema de análisis de componentes principales PCA, permite definir grupos de parámetros fisicoquímicos a partir de las correlaciones significativas encontradas entre las variables medidas. De estos grupos de variables conformados que denotan una misma condición ambiental se seleccionan las variables más significativas y de fácil determinación para ser utilizadas en la construcción de los índices de calidad.

Según Andrews et al. (2002) se asume que los componentes principales (CP's) que reciben mayores autovalores (*eigenvalues*) son los que mejor representan la variación en el sistema. Por lo tanto, solamente los CP's con autovalores ≥ 1 fueron examinados (Kaiser, H.F., 1960).

De acuerdo con este análisis y con el criterio expuesto, se seleccionaron los 5 primeros componentes principales por presentar un autovalor ≥ 1 (Tabla 3.15).

- 2) Dentro de cada componente principal, cada variable tiene un peso (*factor loading*) que representa la contribución de la variable en la composición del PC. Solamente las variables con mayor peso fueron utilizadas de cada PC para la selección del SMD. Se consideró un peso $\geq 0,40$ (en valor absoluto) (Wander y Bollero, 1999)

como criterio de selección. Las variables así seleccionadas se muestran en negrita en la Tabla 3.16.

Tabla 3.15: Matriz de correlación de los autovalores

Número de valor	Autovalor	% total de varianza	Autovalor acumulado	% acumulado
1	3,603001	27,71539	3,60300	27,7154
2	1,858531	14,29639	5,46153	42,0118
3	1,366327	10,51021	6,82786	52,5220
4	1,167586	8,98143	7,99545	61,5034
5	1,057627	8,13559	9,05307	69,6390
6	0,850803	6,54464	9,90388	76,1837
7	0,735077	5,65444	10,63895	81,8381
8	0,609127	4,68559	11,24808	86,5237
9	0,576163	4,43202	11,82424	90,9557
10	0,410563	3,15818	12,23481	94,1139
11	0,327063	2,51587	12,56187	96,6298
12	0,265372	2,04133	12,82724	98,6711
13	0,172759	1,32892	13,00000	100,0000

Tabla 3.16: Correlaciones variable – factor (Loading factor)

Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6	Factor 7	Factor 8	Factor 9	Factor 10	Factor 11	Factor 12	Factor 13
CE	-0,696670	-0,315744	-0,080484	-0,276149	0,230306	-0,063677	0,193078	-0,113652	0,332159	0,015761	0,121098	-0,314019	0,032849
Dap	-0,294944	0,112476	-0,441357	0,412702	-0,337296	0,542817	-0,259999	-0,094686	0,164672	-0,119500	0,016292	-0,078216	0,049740
RM 0-5	-0,779525	0,014393	0,156643	0,293502	0,341778	-0,042162	-0,142861	0,114557	-0,140932	0,147275	-0,075504	0,032862	0,284602
RM 5-10	-0,717478	-0,036699	0,220155	0,353152	0,363705	0,058701	-0,197121	0,181356	-0,110485	-0,065873	0,141152	-0,021343	-0,257479
HR	0,506738	0,309053	-0,434312	-0,312717	0,210966	-0,139590	-0,344603	0,244762	-0,180410	-0,162605	0,191789	-0,131711	0,074257
P	0,073033	-0,679719	0,141829	-0,402837	0,121051	0,166127	-0,429183	0,142769	0,198456	-0,065333	-0,233037	0,072229	-0,015687
MO	0,403945	0,669293	0,057078	-0,086445	0,254392	0,325873	0,034527	0,186640	0,129908	0,321934	-0,170470	-0,132938	-0,062917
Ph	-0,627456	0,374790	-0,399026	-0,256900	0,075893	-0,064472	0,023112	0,092204	0,314663	0,072179	0,122303	0,319633	-0,017707
Ca	-0,453705	0,329548	0,457031	-0,261640	-0,259619	0,219708	0,258391	0,355127	-0,015110	-0,308898	-0,017619	-0,017468	0,058323
Mg	-0,461946	-0,393945	-0,255596	-0,386855	-0,229102	0,327471	0,092427	0,071275	-0,404405	0,265522	0,090148	0,003482	-0,029931
Na	-0,639780	0,324780	-0,396726	-0,176618	0,152628	-0,114144	0,044135	-0,228158	-0,218045	-0,181762	-0,345231	-0,037590	-0,071461
K	-0,195891	0,446933	0,534074	-0,356471	-0,027575	0,124088	-0,325252	-0,453102	-0,055624	0,027875	0,133934	0,016962	0,015061
N	0,471491	-0,172205	-0,063199	-0,015094	0,606749	0,453327	0,288464	-0,170443	-0,066456	-0,175246	0,076425	0,121205	0,047428

3) Con las variables seleccionadas de cada factor se realizó un análisis de correlación para determinar si las variables podían ser redundantes y por lo tanto eliminarlas del SMD (Tabla 3.17).

Tabla 3.17: Análisis de correlación entre las variables físico – químicas

Variable	CE	DAP	RM_0-5	RM_5=1	HR	P	MO	Ph	Ca	Mg	NA	K	N
CE	1,00												
DAP	0,02	1,00											
RM_0-5	0,43	0,14	1,00										
RM_5=1	0,40	0,18	0,79	1,00									
HR	-0,36	-0,13	-0,39	-0,36	1,00								
P	0,20	-0,15	-0,07	-0,02	0,00	1,00							
MO	-0,38	-0,05	-0,21	-0,23	0,36	-0,25	1,00						
Ph	0,46	0,24	0,36	0,27	0,00	-0,20	0,02	1,00					
Ca	0,18	0,01	0,23	0,26	-0,28	-0,12	0,07	0,26	1,00				
Mg	0,39	0,17	0,18	0,13	-0,19	0,23	-0,35	0,22	0,17	1,00			
NA	0,39	0,20	0,42	0,30	-0,02	-0,26	-0,11	0,59	0,19	0,26	1,00		
K	0,02	-0,08	0,12	0,11	-0,07	-0,05	0,19	0,12	0,35	-0,06	0,15	1,00	
N	-0,13	-0,15	-0,26	-0,18	0,18	0,14	0,26	-0,31	-0,29	-0,12	-0,23	-0,16	1,00

El análisis indicado mostró que las únicas variables que están correlacionadas (coeficiente de correlación $> 0,60$) fueron RM 0-5 y RM 5-10, por lo que el resto de las variables fueron todas consideradas relevantes e incluidas en el SMD. Es decir, el SMD con el que se trabajó está conformado por todas las variables analizadas (excepto RM 5-10), ya que cada una de ellas brinda información relevante y diferente del estado del suelo y por lo tanto deben ser tomadas en cuenta para un análisis del efecto que tienen diferentes prácticas de manejo sobre el suelo.

CONCLUSIONES

Caracterización de los sistemas de uso de suelo

El análisis de las variables físico – químicas, nos permite tener un conocimiento bastante amplio del estado ambiental de los diferentes sitios de muestreo.

Nuestros resultados muestran que la cantidad de MO de los tres sistemas presenta valores entre mediano a muy bien provistos.

El resto de las variables sí presentan diferencias entre los sistemas, demostrando que las diferentes prácticas afectan sus valores, lo cual queda demostrado con el análisis discriminante en el cual se ve claramente que los tres sistemas de uso son, ambientalmente hablando, diferentes.

Selección del set mínimo de datos

En el caso del segundo objetivo que constó en seleccionar un SMD después de utilizar la metodología propuesta por Andrews et al. (2002), el análisis nos indica que debemos utilizar todas las variables seleccionadas, con la excepción de la RM 5-10.

Al comienzo de este estudio se eligieron todas estas variables para analizar, considerando que cada una de ellas brinda información relevante de diferentes

aspectos del estado del suelo, y que la selección del SMD confirme estos resultados, da mayor peso a esa primera apreciación.

BIBLIOGRAFIA

- Abril, A., 2004. ¿Son los microorganismos edáficos buenos indicadores de impacto productivo en los ecosistemas? *Ecología Austral* 13: 195-204.
- Andrews, S.S., Karlen D.L., Mitchell J.P., 2002. A comparison of soil quality indexing Methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 90: 25–45.
- Barrios, E., Delve, R., Barreto, H., Trejo T.M., 2000. Identificación y clasificación de indicadores locales de calidad se suelo.
- Berardo, A., 2004. Manejo de la fertilización en una agricultura sustentable. *Informaciones Agronómicas*, N° 23.
- Conti, M., 2000. Potasio en el suelo. Principio de Edafología con énfasis en suelos argentinos. En: Conti M. (Ed). Editorial Facultad de Agronomía. Distribución Orientación Gráfica Editora S.R.L.
- Doran, J.W., Parkin T. B., 1994. Defining and assessing soil quality p. 3-21. In J.W. Doran et al (ed.) *Defining soil quality for a sustainable environment*. SSSA Special Publ. 35. SSSA and ASA. Madison, WI.
- Ferreras, L., Toresani, S., Bonel B., Fernandez, E., Bacigalupo, S., Faggiolo, V., Beltran, C., 2009. Parámetros químicos y biológicos como indicadores de calidad del suelo en diferentes manejos. *Cl. Suelo* 27(1): 103-114.
- Follett, R.F., 2001. Innovative 15N microplot research techniques to study nitrogen use efficiency under different ecosystems. *Comm. in Soil Sci. Plant Anal.* 32 (7&8): 951-979.
- Fried, M., Broeshart, H., 1967. *The soil-plant system in relation to inorganic nutrition*. Academic Press, New York.
- Gomero, O.L., Velásquez A.H., 1999. *Manejo Ecológico de Suelos Conceptos, Experiencias y Técnicas*. Publicado por la Red de Acción en Alternativas al uso de Agroquímicos.
- Gregorich, E.C., Carter, M.R., Angers, V.C., Monreal, M., Ellert, B-H., 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soil. *Can J. Soil Sci.*, 367-385.
- Israelsen, O., Hansen, V., 1979. *Principios y aplicaciones del riego*. Ed. Reverté. Barcelona.

- Kaiser, H.F., 1960. The application of electronic computers to factor analysis. *Educ. Psychol.Meas.* 29: 141–151.
- Larson, W.E., Pierce F.J., 1991. Conservation and enhancement of soil quality. p 175-203. In *Evaluation of sustainable management in the developing world*. Vol. 2. IBSRAM Proc. 121 (2). Int. Board for Soil Res. and Management., Bangkok. Thailand.
- Martinez-Salgado, M. M., Gutiérrez-Romero, V., Janssens, M., Ortega-Blu, R., 2010. Biological soil quality indicators: a review.
- Masciandaro, G., Ceccanti, B., 1999. Assessing soil quality in different agro-ecosystems through biochemical and chemico-structural properties of humic substances. *Soil Tillage Research* 51(1–2): 129-137.
- Quiroga, A., Funaro, D., 2004. Materia orgánica, factores que condicionan su utilización como indicador de la calidad en molisoles de las regiones semiárida y subhúmeda pampeana. XIX C.A.C.S., Paraná. Resumen pág. 476.
- Rioja Molina, A., 2.002. *Apuntes de Fitotecnia General*, E.U.I.T.A., Ciudad Real.
- Sainz Rosas, H., Echeverria, E.H., Angelini, H. 2011. Niveles de Materia Orgánica y pH en suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana Argentina. *Informaciones Agronómicas* N° 2. IPNI.
- Sanchez, F.I. & Sanchez, S.C., 1982. Sobre la física del suelo y su importancia en el uso y conservación del mismo. *Centro de edafología y biología aplicada de Salamanca*, Vol VIII.
- Schoenholtz, S.H., Van Miegroet, H., Burger, J.A., 2002. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management* 138: 335-356.
- Taylor, H.M., Gardne, H.P., 1966. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content and strength soils. *Soil Sci.* 96: 153 – 156.
- Thomsa, W., Haszler, G.R., 1996. The effect of organic matter and tillage on maximum compactibility of soil using the Proctor test . *Soil Science* 161: 502-508
- Urricariet, S., Lavado, R.S., 1999. Indicadores de deterioro en suelos de la Pampa Ondulada. *Ciencia del Suelo.* 17(1):37-44.
- United States Department of Agriculture (USDA), Natural Resources Conservation Service (NRCS). 2014. *Keys to Soil Taxonomy*. 12 th Edition.

- Vázquez, M.E. 2005. Calcio y Magnesio, acidez y alcalinidad del suelo. En: Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos (ed. HE Echeverría y FO García). Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina. Pp. 161-188.
- Vogel, H., 1992. Morphological and hydrological characteristics of gleyic granitic soils and their potential for crop production. *Soil technology*. 5: 303-317
- Wander, M.M., Bollero, G.A., 1999. Soil quality assessment of tillage impacts in Illinois. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 961–971.
- White R.E., 2006. Principles and Practice of Soil Science. The Soil as a Natural Resource Fourth Edition.

CAPÍTULO IV
ANÁLISIS DE LAS COMUNIDADES EDÁFICAS

INTRODUCCIÓN

Importancia de la biota edáfica

Durante los últimos 20 años, el conocimiento sobre la importancia de la biota edáfica en el funcionamiento del suelo y por extensión en los ecosistemas terrestres, ha ido continuamente en crecimiento, finalizando en algunas importantes aplicaciones en el campo agronómico (Lavelle et al., 1999). Así se sabe que los organismos del suelo son indicadores sensibles, y reflejan la influencia antrópica debido a las prácticas de manejo y cambios climáticos (Martinez-Salgado, M.M., 2010).

La biota edáfica juega un papel muy importante en los diferentes procesos que ocurren en el suelo, que influyen en su formación, ciclos de nutrientes, descomposición de la materia orgánica, la porosidad, la formación de agregados, y la capacidad de retención de agua. Además, cada componente de las comunidades edáficas tiene un papel determinado en su nicho específico que difícilmente puede ser reemplazado por otros presentes en el sistema (Lavelle et al., 1997).

Los diversos servicios ecosistémicos que la biota edáfica proporciona (Tabla 4.1), desempeñan un papel crucial en el mantenimiento de la sustentabilidad del suelo. La comunidad de invertebrados del suelo puede tener efectos directos e indirectos sobre la productividad de la tierra. Los impactos directos son aquellos en donde los organismos específicos afectan el rendimiento del cultivo inmediatamente. Los efectos indirectos incluyen los proporcionados por los organismos del suelo que participan en los ciclos del carbono y nutrientes, en la modificación de la estructura del suelo, y en las interacciones de la red alimentaria que generan los servicios ambientales que a la larga afectan la productividad (Barrios et al., 2001).

Tabla 4.1: Influencia de la biota del suelo en los procesos ecosistémicos. Fuente: Hendrix et al., 1990 y Altieri, M.A., 1993.

	Ciclado de nutrientes	Estructura del suelo	Algunos servicios a la agricultura
Microfauna	Regula la población de hongos y bacterias. Participa en el ciclado de nutrientes.	Afecta la estructura de los agregados a través de interacciones con la microflora.	(+) Facilitación de la disponibilidad de nutrientes para las plantas cultivadas. (+) Supresión de enfermedades. (+) Control biológico de insectos plagas. (+) Detoxificación de los agroquímicos presentes en el agroecosistema.
Mesofauna	Regula la población de la microfauna. Participa en el ciclado de nutrientes. Fragmenta residuos vegetales.	Produce pellets fecales. Crea bioporos. Promueve la humificación.	(+) Facilitación de la disponibilidad de nutrientes para las plantas cultivadas. (+) Regulación de especies problemáticas para raíces y coronas de cultivos y pasturas.
Macrofauna	Fragmenta residuos vegetales. Estimula la actividad microbiana.	Mezcla partículas minerales y orgánicas. Redistribuye la materia orgánica y los microorganismos. Produce pellets fecales. Crea bioporos. Promueve la humificación.	(+) Estructuración del suelo. (+) Facilitación de la absorción de nutrientes por las raíces de cultivos y pasturas.

Según Lavelle et al. (2006), los invertebrados del suelo son esenciales en el mantenimiento de los servicios ecosistémicos (bienes y funciones de los ecosistemas que benefician a las poblaciones humanas) que los suelos prestan: producción vegetal, reciclado de nutrientes, regulación del clima, secuestro de gases con efecto invernadero, detoxificación, control del flujo de agua, etc.

Las redes tróficas del suelo dependen en gran medida del material detrítico, el cual cae al suelo a partir de la muerte de organismos (principalmente vegetales) o de sus partes, y forma un reservorio de materia orgánica con diferentes niveles de descomposición por la acción de hongos y bacterias. Estas redes tróficas tienen, en general, una conectividad y una riqueza alta (Fig. 4.1), comparadas con redes tróficas terrestres sustentadas en la producción primaria directa (es decir, basadas en la herbivoría) (Elliott et al., 1988; Margalef, R., 1992; Momo y Falco, 2003).

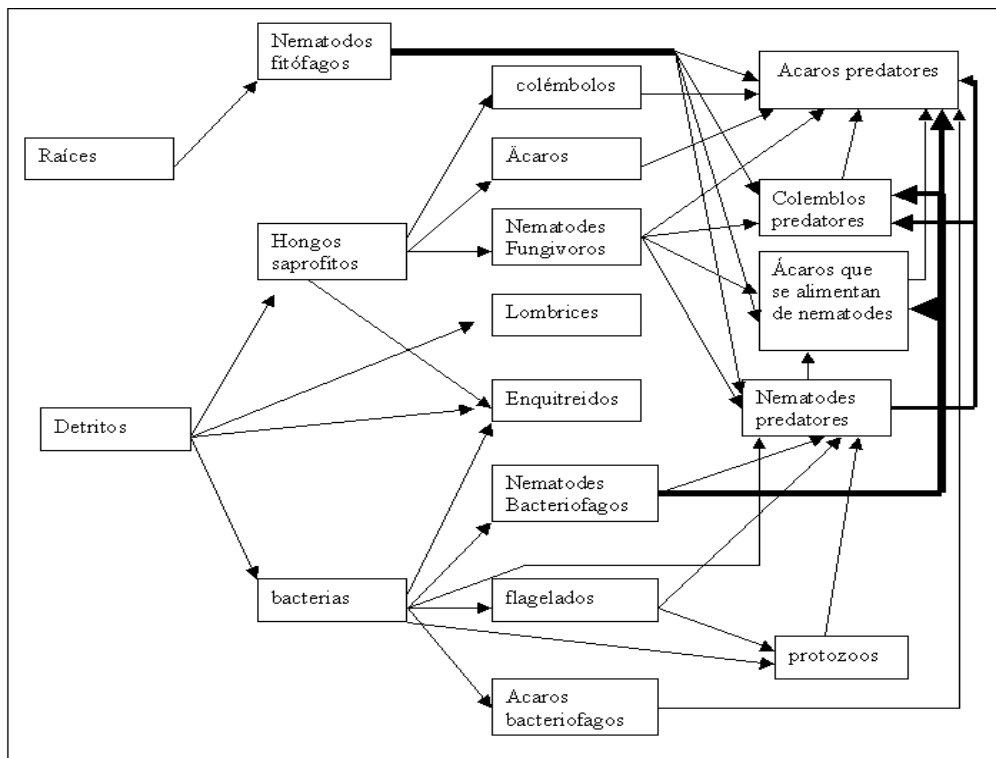


Fig. 4.1: Red trófica del suelo. Fuente: Smeding y de Snoo (2003)

Por lo tanto, el estudio de la biota edáfica es de difícil abordaje, debido principalmente a la compleja y altamente variable naturaleza del hábitat del suelo, la pequeñez, frágil naturaleza y hábitos usualmente crípticos de los animales edáficos, así como por problemas taxonómicos, de muestreo y de diseño experimental (Pilatti et al., 1988).

Clasificación

Existen diferentes formas de clasificar la biota edáfica:

- 1) Se la puede clasificar por el grado de presencia en el suelo o la utilización de microhábitat por diferentes formas de vida (Fig. 4.2) en:
 - i. Transitorias: son aquellas que se refugian durante el invierno en el suelo, pero pasan el resto de su ciclo de vida en los diferentes estratos vegetales.
 - ii. Temporarias: solo pasan fuera del suelo la etapa adulta.
 - iii. Periódicas: cumplen todo su ciclo en el suelo pero emergen como adultos para reproducirse.
 - iv. Permanentes: habitan en la superficie o dentro del suelo durante toda su vida, como los ácaros y los colémbolos.

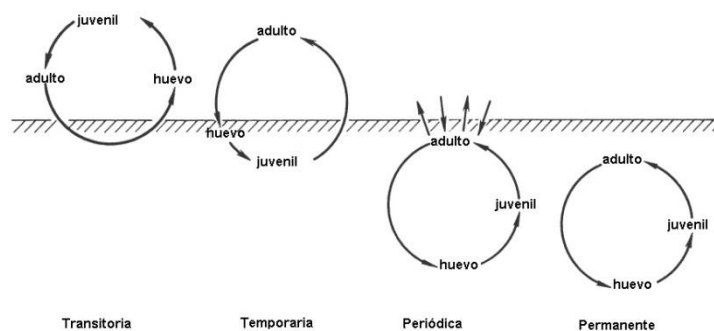


Fig. 4.2: Clasificación de la biota edáfica según la presencia en el suelo de los estadios de su ciclo de vida. Adaptado de: Wallwork, J.A., 1970.

- 2) De acuerdo al ancho corporal (Swift et al., 1979) se clasifican en:
- i. Microflora y Microfauna: hasta 100 μm
 - ii. Mesofauna: de 100 μm a 2 mm
 - iii. Macrofauna: de 2 mm a 20 mm
 - iv. Megafauna: más de 20 mm

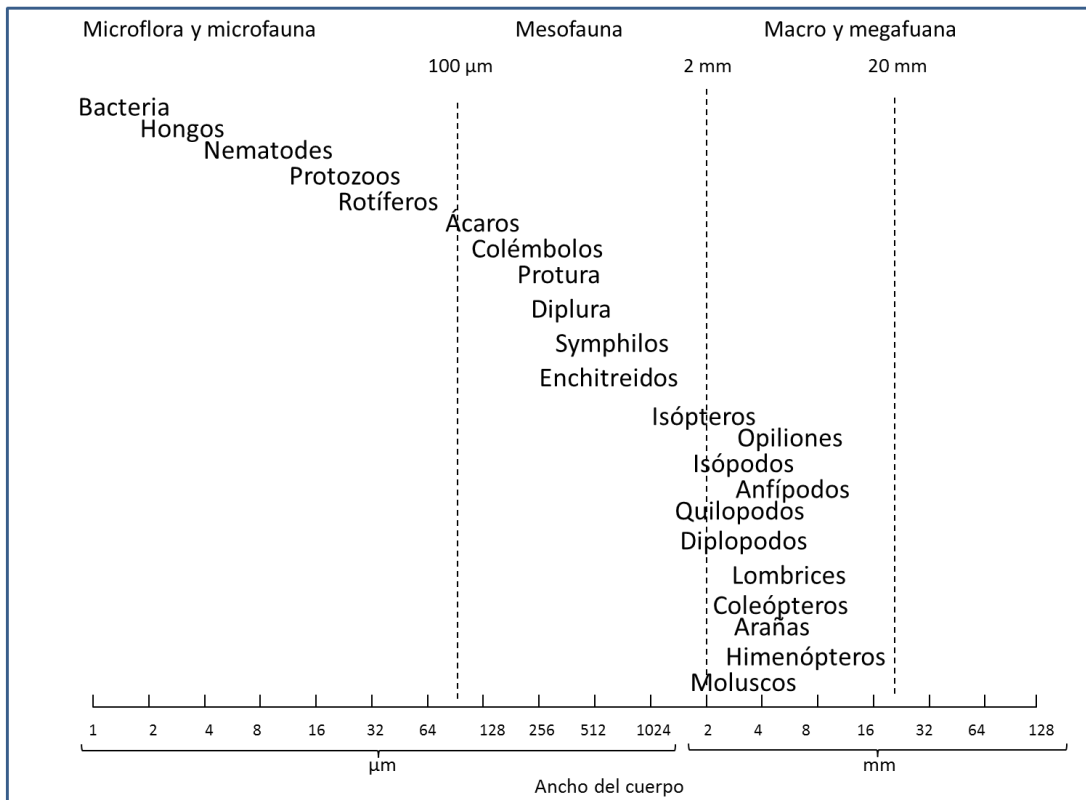


Fig. 4.3: Clasificación de la biota edáfica según su ancho corporal. Fuente: Swift et al., 1979

Esta clasificación resulta apropiada por la relación que existe entre esa característica y la utilización por parte de la biota edáfica de los diferentes hábitats en el suelo: la microflora y microfauna (hongos, bacterias, nematodos, protozoos, rotíferos) habita en las películas de agua que se encuentran alrededor y entre las partículas del suelo, la mesofauna (ácaros, colémbolos, protura, diplura, symphilos, enchitreidos) utiliza los espacios porosos ocupados por el aire en el suelo y la broza, mientras que la macrofauna y megafauna (lombrices, arañas, hormigas, termitas, coleópteros, moluscos, etc.) poseen la capacidad de excavar el suelo y crear sus propios espacios (galerías y poros).

3) Según su funcionalidad en el suelo (Lavelle, P., 1997):

- i. El primer grupo funcional definido consiste en los organismos de la micro red trófica, correspondiente a la parte de la red trófica en general, que relaciona a los microorganismos con sus predadores. Este grupo corresponde principalmente a la parte de la microfauna depredadora de hongos y bacterias y sus depredadores. Estos organismos no crean estructuras.
- ii. El segundo grupo funcional consiste en la mesofauna y grandes artrópodos y fue descrito por Lavelle como transformadores de la hojarasca. Estos organismos ingieren puramente material orgánico, fragmentándolo físicamente, liberando pellets fecales con un importante rol en la actividad microbiana (“digestión extra rumen”, Aira et al., 2009). Este proceso de digestión libera nutrientes, los cuales pueden subsecuentemente ser reabsorbidos por los descomponedores. Los pellets fecales están también involucrados en la estabilización de la estructura y agregación del suelo (Balesdent et al., 2000).
- iii. El último grupo funcional consiste en los ingenieros del ecosistemas, la mayoría de los cuales son miembros de la macrofauna: lombrices (especies anecicas y endogeicas), termitas y hormigas. Estos organismos crean diversas estructuras organominerales e interactúan con microorganismos a través de la digestión interna tipo rumen. Ellos alteran las condiciones físicas y químicas del suelo, modificando el flujo de agua y nutrientes, afectando indirectamente el crecimiento y desarrollo de otros organismos vivos, en particular los cultivos. Los ingenieros del ecosistema, no solamente contribuyen a la agregación del suelo, liberando los pellets fecales, sino también contribuyen a la estructura del suelo, creando nidos o escavando galerías, afectando, por lo tanto, la circulación de nutrientes y agua y el desarrollo y la función de las raíces (Roger-Estrade, J., 2010).

En esta tesis se sigue principalmente la clasificación propuesta por Swift et al., (1979) y se estudiaron en particular algunos grupos de la biota edáfica pertenecientes a la micro, meso y macrofauna. A su vez estos grupos también están incluidos en la clasificación de Lavelle, ya que la respiración y fijación biológica de nitrógeno son medidas de la actividad de la microfauna que son elementos componentes de las micro-redes; los ácaros y los colémbolos están incluidos dentro del grupo de los transformadores de la hojarasca y las lombrices que están incluidas dentro de los ingenieros del ecosistema, logrando así una “respuesta integral del sistema” al uso del suelo y a las prácticas de manejo asociadas.

Los grupos más representativos de la biota edáfica

Microflora y Microfauna

La microflora y microfauna está representada por bacterias, hongos, protistas, nematodos y rotíferos. Son formas de vida de tamaño menor a 100 μm . Los procesos microbianos edáficos que en gran parte determinan la descomposición de la materia orgánica, el ciclado de nutrientes y la incorporación de nitrógeno atmosférico entre otros servicios ecosistémicos, dependen de manera crítica de la estructura de la comunidad de microorganismos presentes (Botta et al., 2004). Estos microorganismos mantienen funciones ecológicas esenciales que determinan en gran medida la sustentabilidad a largo plazo de los agroecosistemas (Giller et al., 1997; Brussaard et al., 2007; Alvarez et al., 2011).

Así, la diversidad de la biota edáfica en general y de los microorganismos de suelo en particular, se relacionan con su capacidad productiva, el uso eficiente de agua y los nutrientes (Thrupp, L.A., 2000). Adicionalmente el mantenimiento de una alta biodiversidad puede conferir resistencia y resiliencia favoreciendo la sustentabilidad de los ecosistemas (Folke et al., 2004; Brussaard et al., 2007).

Diferentes usos del mismo suelo, pueden afectar diferencialmente a los microorganismos del suelo, modulando así los servicios ecosistémicos brindados por este grupo de organismos. La estructura de la comunidad microbiana y sus modificaciones pueden deberse a factores ambientales, residuos de cosecha, plaguicidas, fertilizantes u otras prácticas de manejo que podrían alterar las condiciones del suelo donde estos procesos tienen lugar (Milkanová et al., 2009).

La respiración edáfica y la capacidad bacteriana para la fijación de nitrógeno atmosférico, son dos variables que pueden ser utilizadas para medir indirectamente la actividad microbiológica (Di Ciocco et al., 2014) y estimar así la capacidad del suelo para el reciclado de nutrientes y el impacto de la actividad humana sobre éste.

Mesofauna

Los colémbolos

El orden Collembola (phylum Arthropoda) lo constituyen pequeños hexápodos sin alas, provistos de antenas, seis segmentos abdominales y dos apéndices abdominales particulares. Uno es la fúrcula caudal, que actúa como un resorte que les permite saltar y tiene su propio “broche de seguridad”, el tenáculo, que se encuentra en el tercer segmento abdominal salvo en las formas sin fúrcula. El otro es el tubo ventral o colóforo en el primer segmento abdominal que cumple funciones respiratorias, de adhesión y de captación de agua.

Los colémbolos son pequeños (rara vez sobrepasan los 8 mm de longitud), tienen ojos simples (no más de ocho a cada lado de la cabeza) y se alimentan de vegetación en descomposición o de la microflora del suelo (hongos y algas fundamentalmente). Existen unas 6000 especies descritas en el mundo.

Ciclo de vida: a pesar de no existir cópula, la transferencia del espermátforo se lleva a cabo con o sin un comportamiento ritual entre los dos sexos. Luego de la

transferencia, las hembras ponen paquetes de 8 a 50 huevos que tardan de unos días hasta 2 o más meses en eclosionar. Los juveniles nacen con el número de segmentos que tendrán cuando adultos (son epimórficos) y no sufren grandes cambios durante su desarrollo hasta llegar a adultos (ametábolos); sin embargo, cambian de cutícula a lo largo de toda su vida. Su ciclo de vida desde huevo hasta adulto varía entre 8 semanas hasta un año y algunos pueden vivir hasta 3 años.

Cualquier muestra de suelo, sobre todo donde hay abundante hojarasca, puede contener cientos de colémbolos. Es bastante sencillo separarlos por flotación ya que la presencia de sustancias hidrófobas en su cutícula hace que floten y se amontonen en pequeños grupos en la superficie del agua. Las especies con fúrcula bien desarrollada son fáciles de distinguir por sus movimientos de salto.

Los colémbolos son el grupo de hexápodos de mayor distribución conocida, se encuentran en los suelos de todas las latitudes incluyendo la Antártida y parecen estar limitados solamente por la extrema sequía. Influyen con sus pellets fecales a la microestructura del suelo y están cerca de la base de las redes tróficas edáficas que se basan en el material detrítico; a su vez son presa de algunos ácaros predadores.

Los colémbolos son habitantes típicos del suelo, viven en poros llenos de aire y en la capa del mantillo. Comparado con los ácaros, los colémbolos son más dependientes de altas humedades y son más restrictivos en su dieta, muchas especies se alimentan de hongos y algas; pero pueden alimentarse de plantas vivas o ser depredadores (Wurst et al., 2012). Son, junto con los ácaros oribátidos, los artrópodos dominantes en el suelo.

Según su ubicación en el perfil del suelo y sus características morfológicas se pueden clasificar en:

- i. Epiedáficos, típicos de la superficie del suelo o de las plantas, tienen las antenas y la fúrcula larga, pigmentación desarrollada y ocho ojos a cada lado de la cabeza.
- ii. Hemiedáficos presentan antenas moderadamente largas y pigmento bien desarrollado.
- iii. Euedáficos, característicos de las capas profundas del suelo, tienen antenas cortas, fúrcula y ojos reducidos o ausentes, y carecen de pigmento o está reducido éste a los ojos.

Los ácaros

Dentro del Phylum Arthropoda, Subphylum Chelicerata, Clase Arachnida, podemos ubicar a la Subclase Acarina, es decir los ácaros. Estos pequeños arácnidos de no más de 2 o 3 mm de longitud no presentan casi segmentación evidente, aunque se suelen distinguir un gnatosoma y un idiosoma. El gnatosoma contiene las piezas bucales (quelíceros) y los pedipalpos. El idiosoma contiene entre dos y cuatro pares de patas (la mayoría de las veces cuatro) y los orificios genitales. Los estigmas traqueales, en número variable, se abren en distintas partes del cuerpo y esto permite definir y distinguir los subórdenes. Se han descrito unas 45.000 especies y se estima que éstas representan sólo el 5 % de las que existen (<http://tolweb.org/Acari>).

Los ácaros del **Orden Mesostigmata o Gamasida** son ubicuos en los suelos donde actúan como depredadores de nematodos, enquitreidos o microartrópodos, tanto en el suelo propiamente dicho como en la hojarasca, aunque otros son simbioses de mamíferos, aves, reptiles o artrópodos. Relativamente pocos se alimentan de hongos, polen o néctar. Este grupo puede encontrarse asociado con suelo, mantillo, madera en descomposición, compost, abonos y detritos de plantas y animales. Su gnatosoma es característico porque forma una especie de tubo o embudo con su base esclerotizada. Puede encontrárselos en número de varios miles por metro cuadrado.

En el **Orden Trombidiformes, Suborden Prostigmata** encontramos ácaros comedores de hongos y algas, depredadores y comedores de plantas. Pueden vivir en la superficie exterior del suelo o en musgos, humus y excrementos de los animales o en las partes altas de las plantas.

En el **Orden Sarcoptiforme, Suborden Astigmata** podemos encontrar ácaros micófagos, saprófagos, fitófagos o parásitos. Son organismos poco esclerotizados, de movimientos lentos. Respiran a través de la cutícula. Sus piezas bucales están adaptadas a la masticación y su labor facilita el proceso de humificación en el suelo ya que fragmentan el material detrítico ofreciendo mayor superficie de ataque a las bacterias.

Los ácaros del **Orden Sarcoptiforme, Suborden Oribatida**, llamados ácaros del musgo son uno de los grupos numéricamente dominantes entre los microartrópodos de los horizontes orgánicos del suelo. Según Iturrondobeitia et al. (2004), este grupo tiene una alimentación variada y elevada capacidad de adaptación, y aunque son principalmente microfitófagos (en su mayoría saprófagos), también pueden regular poblaciones fúngicas y bacterianas.

Macrofauna: Lombrices

Las lombrices de tierra pertenecen a la subclase Oligoqueta, Phylum Annelida. Suelen medir de 9 a 30 cm. Sin embargo, no son animales anchos, ya que su diámetro no alcanza el centímetro. Como todos los animales de su filo, el cuerpo está segmentado en anillos, que pueden llegar a ser 180. Su abdomen es aplanado. Los anillos 31-37 producen una secreción que forma un abultamiento del cuerpo, llamado clitelo, en el que almacenan los huevos antes de la puesta. El color del cuerpo suele ser rosa, marrón o marrón-rojizo en su parte dorsal y más amarillento en la parte ventral. Mientras que un extremo del cuerpo es puntiagudo, el opuesto es redondeado y forma un bulto.

Son hermafroditas: poseen tanto órganos femeninos como masculinos, sin embargo, esto no implica la existencia de autofecundación, ya que los individuos deben cruzarse para intercambiar sus gametos. Cuando alcanzan la madurez se aparean una vez a la semana. Se conocen unas 3100 especies de Oligoquetos.

Desde un punto de vista biogeográfico la riqueza de especies de un sitio puede pensarse como constituida por dos grupos de lombrices, nativas y exóticas. Las nativas incluyen especies que se encuentran en su lugar de origen; la mayoría posee un estrecho rango, es decir son estenoicas, de distribución restringida especialmente a ecosistemas naturales aunque algunas son capaces de sobrevivir en ecosistemas perturbados. Las especies exóticas también llamadas peregrinas son aquellas cuyo lugar de origen no se corresponde con los sitios donde son encontradas y en general han sido introducidas por el hombre. Por su propia naturaleza de especies invasoras, este grupo está formado por especies que pueden tolerar un amplio rango de suelos y variaciones ambientales, es decir son eurioicas y frecuentemente son consideradas el grupo predominante en sistemas antropizados.

En el mismo sentido Lavelle et al. (1999) señaló que las especies exóticas están mejor adaptadas que las nativas a los cambios a nivel continental-regional (lluvias, temperatura) y a nivel local (cambios edáficos, cobertura vegetal, etc.), la mayoría de las nativas son incapaces de adaptarse a las variaciones regionales, aunque algunas especies son capaces de tolerar pequeñas variaciones a nivel local. Lee (1985) afirmó que las exóticas cumplen un rol importante en el mantenimiento de la fertilidad en áreas dedicadas a pastizales y cultivo.

En la Argentina están presentes cinco familias de origen Gondwánico: Glossoscolecidae, Almididae, Ocnerodrilidae, Octochaetidae y Acanthodrilidae. Además, están ampliamente distribuidas las familias exóticas Lumbricidae y Megascolecidae. En la Región Neotropical se encuentran las siete familias entre exóticas y Gondwánicas y en la Región Antártica (estrecha franja en el extremo sur de Sudamérica) hasta hoy, se han encontrado especies pertenecientes a las siguientes familias: Acanthodrilidae y

Lumbricidae (Mischis y Moreno, 2003). La totalidad de especies registradas en la Argentina alcanza a 76 especies dentro de 35 géneros correspondientes a las 7 familias mencionadas (Mischis, C.C., 2000).

Las familias Sudamericanas Ocnerodrilidae y Glossoscolecidae son las que presentan la mayor cantidad de especies, siguiendo Acanthodrilidae, Octochaetidae y Almidae estas dos últimas con escaso número de especies.

Las familias introducidas Megascolecidae y Lumbricidae están bien representadas con 29 especies y una amplia distribución en el país. Estas por su condición de especies eurioicas han colonizado diversidad de ambientes, en especial Lumbricidae.

Desde un punto de vista funcional se consideran los grupos ecológicos representados por las especies epígeas, anécicas y endógeas (Bouche, M.B., 1977):

- i. Epígeas: especies que viven y se alimentan en la capa de hojarasca superficial del suelo.
- ii. Anécicas: especies que producen galerías verticales en la capa mineral del suelo, pero visitan la capa más superficial y son muy importantes en la incorporación de la hojarasca en las capas más profundas del suelo.
- iii. Endogeas: especies que producen galerías horizontalmente y se alimentan principalmente de la rizósfera y el subsuelo.

Bioindicadores

La degradación de suelos debida a la disminución de nutrientes ilustra el proceso de identificación tardía de deterioro del suelo que ha operado durante muchos años. Por lo tanto los usuarios del suelo y aquellos responsables por la formulación de políticas, requieren de indicadores para el diagnóstico temprano de estos procesos de degradación (Barrios et al., 1994).

Los indicadores biológicos o bioindicadores son por naturaleza integrativos ya que reflejan cambios simultáneos en las características físicas, químicas y biológicas del suelo y su resultante en el tiempo. Esta característica hace posible que los bioindicadores capten pequeños cambios en la calidad del suelo y por lo tanto tener un gran potencial para el diagnóstico temprano (Barrios et al., 2001). La composición y la abundancia de la comunidad de invertebrados son indicadores fieles del nivel de calidad o de deterioro del suelo de manera integradora.

Los mesoinvertebrados del suelo son cada vez más a menudo incluidos en la realización de monitoreos y evaluaciones ambientales, pues se considera que son indicadores útiles de cambio ecológico, debido a su abundancia, diversidad, facilidad de recolección, respuesta rápida a perturbaciones del medio ambiente y a su importancia ecológica (Pik et al., 2002; Iturrondobeitia et al., 2004; Parisi et al., 2005; Bedano et al., 2006; Gormsen et al., 2006; Guillen et al., 2006; Barbercheck et al., 2009; Karyanto et al., 2011; Peredo et al., 2012). El reconocimiento de sus cualidades y funciones como indicadores clave en procesos ecológicos sugiere que su estudio puede proporcionar una herramienta útil para la evaluación y el seguimiento de la calidad de los suelos y su restauración ecológica.

El estudio de la edafofauna puede tener como objetivo conocer qué organismos están presentes en un ambiente determinado. Este tipo de estudio básico se ha desarrollado relativamente poco en nuestro país, por lo que es de suma importancia toda nueva información que se pueda proporcionar.

La biodiversidad del suelo refleja la variedad de organismos vivos. El conocimiento que tenemos de la vida en el interior del ambiente suelo es todavía escaso debido a la heterogeneidad del mundo físico y químico, a la diversidad de microhábitats y a la complejidad de los organismos que con su actividad promueven el desarrollo y mantenimiento de un número todavía mayor de microclimas. Por lo tanto la dificultad de estudiar la biodiversidad del suelo y la necesidad de identificar

metodologías comunes para tal finalidad continúa siendo uno de los desafíos más grandes en ciencia del suelo (Giller et al., 2005).

Por otra parte, y siguiendo un enfoque centrado en los aspectos eco-biológicos, Breure, A.M. (2004), pone de relieve la importancia de la actividad biológica y la biodiversidad en la capacidad funcional de los suelos: la actividad biológica está principalmente concentrada en la capa superficial del suelo. Los componentes biológicos de la misma ocupan una fracción mínima (el 0,5% en volumen) del suelo y un 10% de la fracción materia orgánica. Los microorganismos del suelo son responsables de la mayor parte de la actividad biológica asociada a los procesos de regulación de los ciclos de los nutrientes y descomposición de los residuos orgánicos.

Los microorganismos presentan un interesante potencial como indicadores de alta sensibilidad a los cambios edáficos producidos por las prácticas de manejo agrícola y pueden ser utilizados como indicadores potenciales de calidad de los suelos. Abril, A. (2003) observó que los procesos microbianos son indicadores tempranos de la calidad del suelo y puedan anticipar su degradación antes que los parámetros físicos o químicos. Entre estos procesos microbianos la respiración edáfica, la actividad deshidrogenasa y las bacterias fijadoras de nitrógeno han sido reconocidos como los parámetros más sensibles entre distintos parámetros microbiológicos y bioquímicos que fueron evaluados en 49 suelos europeos afectados antrópicamente (Filip, Z.K., 2002).

Teniendo en cuenta que los parámetros microbiológicos son sensibles y fáciles de medir, éstos pueden constituirse en una herramienta útil para diferenciar distintas intensidades de uso de suelo.

A su vez, por ser organismos típicos de la superficie del suelo hasta unos pocos decímetros de profundidad, tanto los ácaros como los colémbolos están expuestos a la presencia de las sustancias tóxicas que llegan al suelo, tales como pesticidas o metales

pesados. Esto ha hecho que se los utilice como buenos indicadores de contaminación del aire y del suelo.

Para que la edafofauna (macro y mesofauna del suelo) sea considerada como un indicador biológico de la calidad del suelo es necesario que esta esté fuertemente ligada a otros indicadores de calidad, tanto físicos como químicos, que se relacione con la productividad de las plantas (sin dañar el medio ambiente); que sean de amplia distribución; fácilmente reconocida y medida; que pueda ser ligada más directamente al concepto de calidad de suelo; que den una respuesta numérica en el momento oportuno (mediciones a priori de abundancia y biomasa) y contar con valores de referencia (Chocobar Guerra, E.A., 2010).

OBJETIVOS:

- 1) Analizar la actividad microbiológica y comparar las diferencias entre los sistemas estudiados.
- 2) Analizar las comunidades de colémbolos, ácaros y lombrices, y comparar las diferencias entre los sistemas estudiados.
- 3) Identificar los grupos de organismos que sean sensibles a los diferentes grados de antropización a través de la utilización de herramientas estadísticas de correlación y ordenación.

DISEÑO DE MUESTREO

Los muestreos se realizaron estacionalmente de Marzo de 2009 a Diciembre de 2010.

En cada uno de los tres sistemas de uso del suelo se determinaron tres sitios (réplicas). En cada una de las ocho fechas de muestreo, se tomaron tres muestras de cada réplica. El número total de muestras fue en consecuencia de: 3 muestras x 3 sistemas de uso x 3 réplicas x 8 fechas = 216 muestras biológicas.

Todas las muestras biológicas se tomaron en las mismas fechas y de los mismos puntos que las muestras físico-químicas.

Se evaluó la respiración edáfica (R) y la fijación biológica de nitrógeno, a través de la actividad de las enzimas nitrogenasas (AN).

Se recolectaron todos los organismos pertenecientes a los grupos de colémbolos, ácaros y lombrices. Se midieron la abundancia, riqueza y diversidad para cada uno de los grupos y se los comparó entre los tres sistemas.

MÉTODO DE ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD MICROBIOLÓGICA

Se evaluó la respiración edáfica (R) (Frioni, L., 1999) y la fijación biológica de nitrógeno, esta última a través de la actividad de las enzimas nitrogenasas (AN) (Hardy y Holstein, 1977). La respiración edáfica mide la actividad microbiana y de la microfauna y microflora del suelo.

Para la respiración edáfica se siguió el siguiente procedimiento:

Muestras de 20 g de suelo de los 10 primeros centímetros de profundidad, con el contenido de humedad original, se colocaron en recipientes de 350 ml, los cuales contenían, en su interior, un recipiente menor en el centro del frasco con una trampa de álcali de 20 ml de NaOH 0,2 N. El sistema se cerró herméticamente y se incubó a 30°C durante 7 días. El CO₂ liberado por la respiración biológica se recuperó en el recipiente con el NaOH. Como controles de la reacción se utilizaron frascos sin suelo y con la trampa de álcali. La producción de CO₂ se determinó por titulación con ácido HCl 0,2 N y fenolftaleína como indicador.

La expresión de las enzimas nitrogenasas de los microorganismos diazotróficos de vida libre se midió por el método de reducción de acetileno, que una porción de la población microbiana del suelo transforma en etileno. El método consistió en tomar 20 g de suelo fresco que se colocó en frascos de 40 ml. Los tubos se cerraron con tapa con

orificio a rosca y septum de goma, y se reemplazó el 10% de su atmósfera con H₂C₂, se agitaron por vortex y se incubaron durante 20 h a 30°C. Se asumió que durante ese tiempo no se alcanzó a producir un empobrecimiento de O₂ que limite la producción de CO₂. La producción de etileno se analizó con un cromatógrafo de fase gaseosa (Perkin Elmer Sigma o KONIK Instruments, España) equipado con detector de ionización de llama y columna de Poropak N para el etileno (N₂ como gas carrier) y de conductividad térmica con columna de Poropak Q.

Midiendo un proceso de reducción juntamente con un proceso oxidativo como es la respiración edáfica, la información provista permite estimar indirectamente la actividad microbológica de los suelos y comparar los efectos de distintas intensidades de uso sobre los mismos (Pidello et al., 1995; Perrotti y Pidello, 1996; Lopez-Hernandez et al., 2006).

Aun cuando las muestras fueron tomadas a campo, llevadas al laboratorio y mantenidas en frío hasta ser procesadas no puede excluirse que, al menos parcialmente, la descomposición de las raíces presentes en la muestra pudiera haber incrementado ligeramente la respiración. Sin embargo, la metodología de toma y procesamiento fue la misma para todas las muestras por lo que cualquier posible efecto de este tipo resultaría la misma para todas las muestras.

Para el análisis estadístico se realizó un análisis no paramétrico de varianza (Kruskall-Wallis ANOVA) para evaluar las diferencias entre los sitios de estudio. Se utilizó una significancia de $p < 0,05$. El software utilizado fue el Statistica versión 7.0.

MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DE LA EDAFOFAUNA

Mesofauna

La toma de las muestras se realizó sobre cuadrados de 25 x 25 x 25 cm de profundidad, ubicados al azar en el área de muestreo (mismos puntos de donde se extrajeron las muestras para el resto de las variables). Para la obtención de la

mesofauna, se tomó una subuestra de 150 cm³ de los primeros 5 cm de suelo. Las muestras se colocaron en heladera a una temperatura de aproximadamente 6°C hasta su arribo al laboratorio para su procesamiento el mismo día (Lakly et al., 2000).

El método seleccionado para la extracción de la mesofauna del suelo fue el embudo de Berlese-Tullgren por ser el método más utilizado y de procesado más rápido.

Embudo de Berlese - Tullgren

Este método fue descrito en primer lugar por Berlese (1905) y luego fue modificado por Tullgren (1918) el cual le agregó el uso de una fuente de luz. El mismo consta de un embudo sobre el cual se coloca un tamiz con un diámetro de malla de 3 mm (Fig. 4.4). Sobre el tamiz se coloca el total de la muestra (150 cm³ de suelo), de forma invertida y ligeramente desagregada manualmente y sobre el conjunto se aplicó una fuente de luz de 40 W de intensidad a 40 cm de distancia durante 10 días. Para evitar un secado demasiado rápido la muestra fue humedecida regularmente durante las primeras 72 h. A medida que la muestra se va secando, los ejemplares se concentran en la parte inferior de la misma y acaban cayendo a un recipiente, completamente oscuro, situado en el extremo del embudo y que contiene alcohol al 70 % como fijador y conservante.

La mayoría de los organismos del suelo son lucífugos (huyen de la luz) al tiempo que higrófilos (con afinidad por la humedad) por lo que resulta fácil extraerlos aplicándoles un gradiente creciente de luz y calor, el cual es el fundamento de este tipo de técnica.

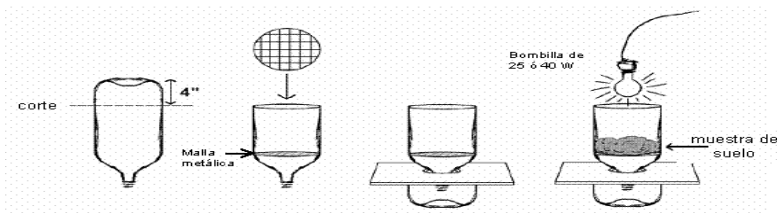


Fig. 4.4: Método: Embudo de Berlese - Tullgren.

Luego de aplicar este método a las dos primeras muestras, se notó que el número de organismos extraídos era bajo comparándolo con la mayoría de la bibliografía existente, por lo que se decidió utilizar el método de flotación con sulfato de magnesio, para corroborar si efectivamente las muestras no contenían gran cantidad de organismos, o si el método no estaba resultando. Por lo tanto, en los dos primeros muestreos, cada muestra se sometió a dos técnicas de extracción en forma sucesiva: Embudo de Berlese-Tullgren, y posteriormente, la misma muestra se sometió al método de flotación con sulfato de magnesio. Una vez que las muestras llegaron al laboratorio, se las colocó en los embudos, por 10 días, luego se las retiró y se las sometió al método de flotación para extraer los artrópodos remanentes.

Técnica de flotación

Este método ha sido desarrollado por Ladell (1936), Salt y Hollick (1944) y por Strickland (1945).

Luego de aplicado el método de Berlese-Tullgren las muestras fueron sometidas a un tamizado húmedo a través de tamices de distinto tamaño de malla, 4, 2 y 1 mm, los cuales se colocaron uno encima del otro dentro de un recipiente plástico (Fig. 4.5). El objetivo de hacer pasar la muestra por estos tamices es ir recolectando los

organismos de mayor tamaño, así como también ir disgregando el suelo en porciones de tamaño cada vez menor para que la solución agregada actúe de manera más eficiente. Al filtrado que quedó en este recipiente (agua con sedimentos) se le agregó una solución de sulfato de magnesio al 1,2 %, se mezcló bien para que esta pueda actuar de forma correcta en todo el volumen de la muestra y se lo dejó actuar durante 20 a 30 minutos. Debido a una diferencia de densidad, esta técnica permite que floten los organismos y así puedan ser extraídos con pipetas Pasteur o pincel. Una vez que la muestra decantó se colectó el sobrenadante y posteriormente se colocó en alcohol 70 % para su conservación y posterior reconocimiento y clasificación.

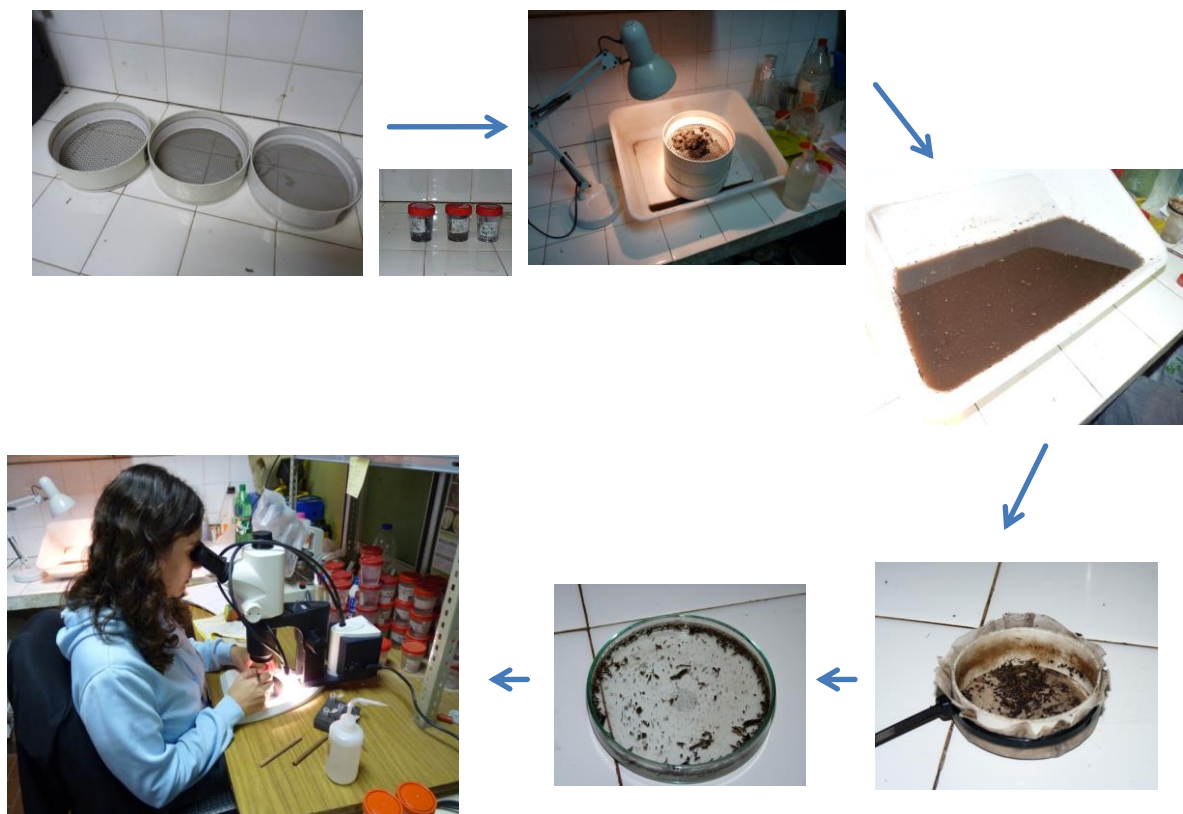


Fig. 4.5: Técnica de Flotación.

Con esto se logró comparar ambos métodos, y así determinar cómo se iban a continuar analizando las muestras a lo largo de los siguientes muestreos.

Los resultados obtenidos (Sandler et al., 2010) muestran que ambos métodos colectaron los mismos grupos taxonómicos (Ácaros: Oribátidos, Mesostigmatas y Prostigmatas, Colémbolos, y los agrupados en la macrofauna: adultos de Dípteros, e Himenópteros), la diferencia encontrada, a este nivel de observación, fue en las abundancias.

Con respecto a la interacción método x grupo faunístico, el test de Wilcoxon mostró diferencias significativas ($n=54$, $p<0,0001$) encontrándose que en este tipo de suelos el método de flotación fue más eficiente para los ácaros y colémbolos, mientras que el método de Berlese-Tullgren extrae los organismos de mayor tamaño tales como dípteros e himenópteros. Para los colémbolos la eficiencia de la técnica de flotación fue, aproximadamente, 7 veces mayor que el embudo, mientras que para los oribátidos esta eficiencia fue 18 veces mayor. La menor eficiencia en estos suelos del método de Berlese con respecto a los ácaros y colémbolos se debe a que estos organismos poseen un tamaño menor, no siendo éste el suficiente para permitir romper la estructura del suelo producto de los movimientos a través de los poros (Stork y Eggleton, 1992).

Los organismos extraídos se determinaron utilizando un estereomicroscopio (lupa) y un microscopio, y su clasificaron taxonómicamente utilizando las claves del Manual de Acarología de Krantz y Walter (2009) para el caso de los ácaros; la clave de Bernava (2008) extraído del libro "Biología y ecología de la fauna del suelo" (Compiladores Momo, F. y Falco, L., 2009) para el caso de los colémbolos.

Macrofauna - Muestreo de lombrices

Las lombrices fueron muestreadas en los mismos puntos donde se tomaron las muestras de suelo. La extracción de los ejemplares fue hecha a mano, usando muestras de suelo de 25 x 25 x 25 cm, se preservaron con suelo hasta su identificación en el laboratorio y luego fueron preservadas en una solución de glicerina-formalina-alcohol (Righi G., 1979).

Fueron identificadas usando la morfología externa con las claves de Righi (1979) y Reynolds (1996). Cada individuo fue clasificado en juvenil o adulto basados en la presencia de clitelo. Los individuos clitelados fueron identificados a nivel de especie y los pre-clitelados a nivel de género.

Análisis estadísticos

Para el análisis de la comunidad de los grupos faunísticos muestreados, se analizaron y compararon varios parámetros de la comunidad que nos permiten tener una descripción y una comparación más detallada entre los sistemas. Estos parámetros son: abundancias a diferentes niveles taxonómicos, riqueza, diversidad y equitatividad.

Para el análisis estadístico se realizó un análisis no paramétrico de varianza (Kruskall-Wallis ANOVA) para evaluar las diferencias entre los sitios de estudio. Se utilizó una significancia de $p < 0,05$. El software utilizado fue el Statistica versión 7.0

La variable tiempo no se utilizó como factor, ya que el objetivo era que el factor tiempo no determine los resultados obtenidos, es decir, que las diferencias encontradas no se deban al momento en que se tomaron las muestras, sino que se deban a los diferentes manejos estudiados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Descripción de la actividad microbiológica y comparación entre los sistemas

Las variables microbiológicas mostraron diferencias estadísticamente significativas (KW $p < 0,05$) según el sistema de uso del suelo. Respecto de la respiración edáfica, los mayores niveles corresponden a los suelos con pastizales naturalizados (PN) luego a suelos del sistema mixto (SM) y los menores valores de respiración se registraron en los suelos del sistema agrícola (SA) (Fig. 4.6).

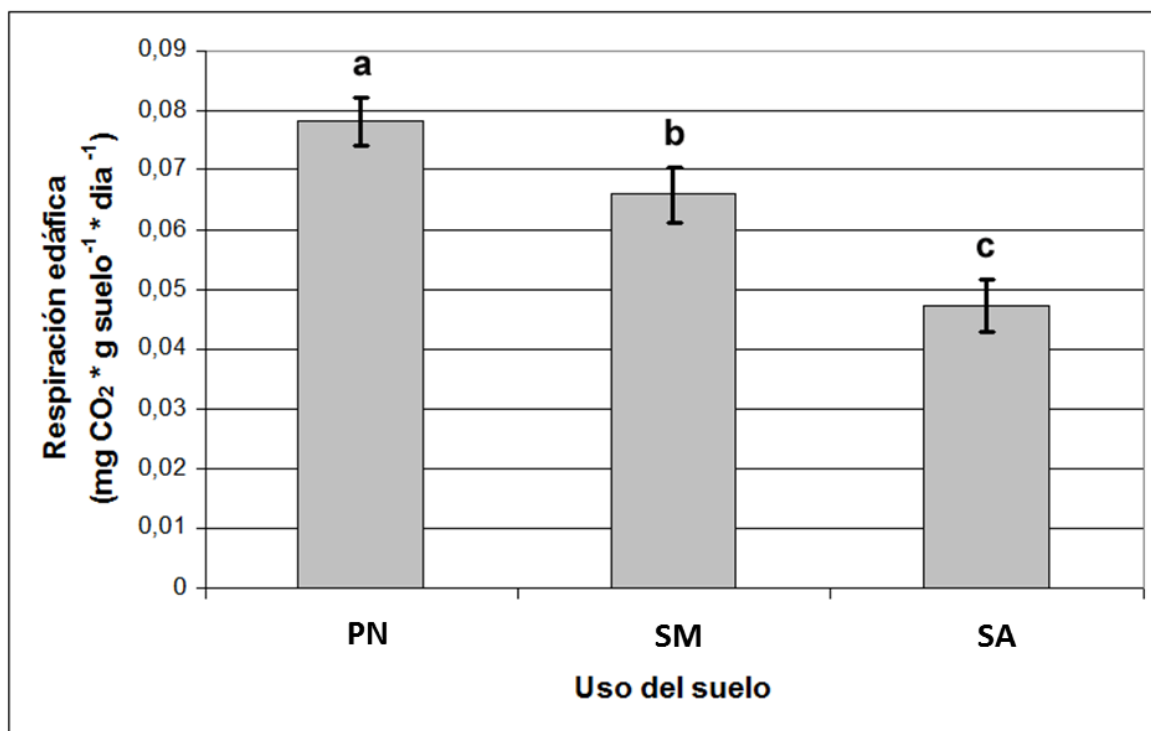


Fig. 4.6: Respiración edáfica de un suelo argiudol sometido a tres diferentes intensidades de uso. PN: Pastizal naturalizado, SM: sistema mixto, SA: sistema agrícola. La respiración decrece significativamente al aumentar la intensidad de uso. Letras distintas entre usos de suelo indican diferencias significativas (Kruskall-Wallis ANOVA, $p < 0,05$). Se muestran promedios y error estándar.

La respiración edáfica en los suelos del sistema PN, superó significativamente a la respiración de los suelos del SM en 19% y en un 65% a la de los suelos del SA.

Con respecto a la actividad nitrogenasa de los suelos, PN presentó niveles significativamente más altos que la del SA. La actividad nitrogenasa en los suelos PN fue un 27% superior respecto de suelos del SA. Los suelos del SM tuvieron valores de actividad nitrogenasa intermedios no diferenciándose significativamente ni de PN ni de SA (Fig. 4.7).

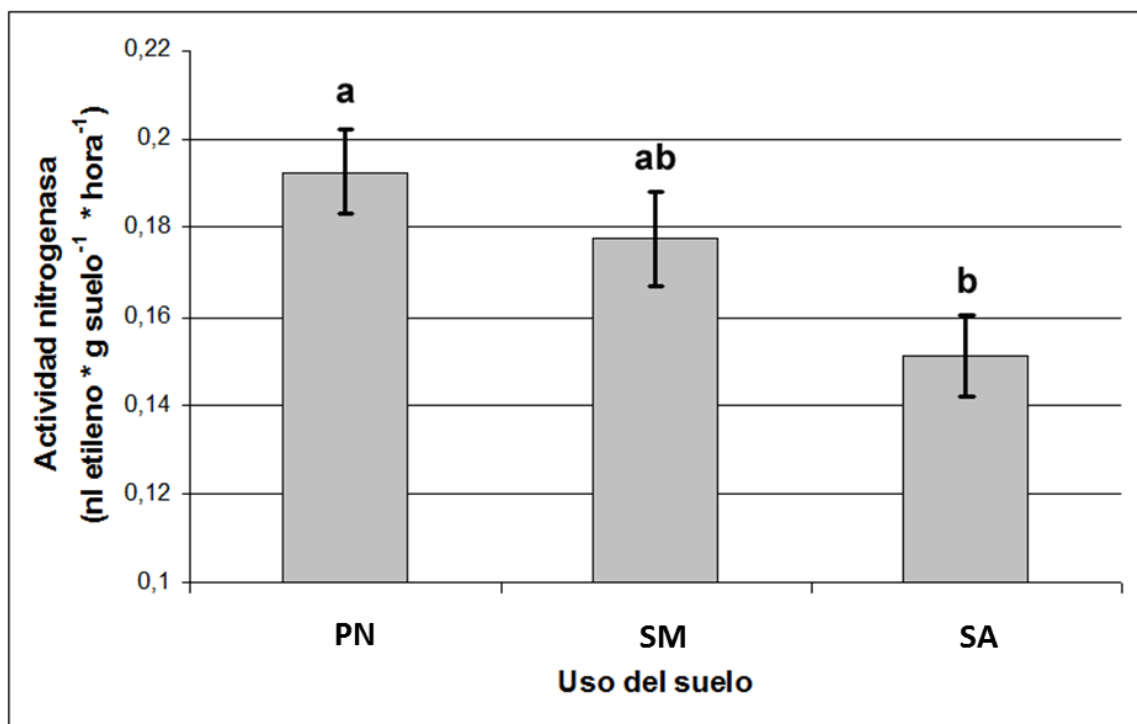


Fig. 4.7: Actividad nitrogenasa de un suelo argiudol sometido a tres diferentes intensidades de uso medida a través de la actividad reductora de acetileno (ARA). PN: Pastizal naturalizado, SM: sistema mixto, SA: sistema agrícola. Letras distintas entre usos de suelo indican diferencias significativas (Kruskall-Wallis ANOVA, $p < 0,05$).

Los mayores niveles de la actividad microbológica en suelos con pastizales naturalizados posiblemente se relacionen con la mayor cantidad de sustratos fácilmente descomponibles (Gomez et al., 1996) presentes en un suelo con una cantidad de raíces y producción de sustratos rizosféricos a lo largo del año más constante que los producidos en un cultivo cuya duración no supera los 6 meses. Las condiciones ambientales relativamente más constantes de suelos con pastizales naturales también contribuyen a una mayor actividad microbiana.

Un aspecto que afecta la actividad microbiana en los suelos sometidos a agricultura, se relaciona con la mayor extracción de nutrientes por los cultivos. Si bien estos suelos con agricultura se fertilizaron con N y P alcanzando niveles semejantes o superiores a los suelos con pastizales naturalizados, posiblemente otros micronutrientes esenciales para la actividad microbiana (no evaluados en esta tesis) no fueron repuestos, como es el caso del cobalto y el molibdeno, dos elementos

componentes de la enzima nitrogenasa, esenciales para llevar a cabo el proceso de fijación de nitrógeno atmosférico por las bacterias de vida libre del suelo.

Aplicaciones reiteradas con nitrógeno y fósforo provocan descensos en el pH (Liebig et al., 2002). El pH del suelo es una de las propiedades químicas más relevantes ya que controla la movilidad de iones, la precipitación y disolución de minerales, las reacciones redox, el intercambio iónico, la actividad microbiana y la disponibilidad de nutrientes (Sainz Rosas et al., 2011). Ramos y Zuñiga (2008), observaron que en condiciones estándares de humedad y temperatura, la respiración de suelo no fue influenciada por el pH entre valores de 4 y 8,2. Sin embargo los resultados de este trabajo indican que los suelos con pH 7,5 (PN) superaron la actividad respiratoria de suelos con pH ácido, correspondiente a los suelos agrícolas, tanto SA como SM.

Los resultados obtenidos para las variables microbiológicas son consistentes con un impacto diferencial según el uso del suelo. Así, la respiración resultó $PN > SM > SA$ y la actividad de la nitrogenasa resultó mayor en PN que en el sistema agrícola. Los suelos de pastizales tuvieron una actividad microbiológica mayor, lo que les permite mantener una elevada capacidad para descomponer residuos vegetales, animales y fijar nitrógeno de la atmósfera. Se supone, conociendo el manejo de estos suelos, que la mayor actividad microbiológica se asocia a un menor impacto negativo que sufre el suelo. Aunque se sabe que no siempre un impacto negativo lleva a menores valores de actividad microbiana y que definir umbrales o valores límites o rangos son muy difíciles de establecer, ya que cada sistema tiene características propias en cuanto a la actividad de las poblaciones microbianas (Abril, A., 2003).

Consistentemente con los resultados aquí presentados, Nannipieri (1994), observó que los parámetros biológicos y bioquímicos tienden a reaccionar de una manera más rápida y sensible a los cambios producidos por el manejo del suelo, por lo tanto podrían constituir una señal temprana y ser de utilidad para estimar la calidad edáfica, incluso antes que las propiedades físicas y químicas.

Estos resultados son significativos en el marco del uso sustentable del recurso suelo, pues apoyan la hipótesis de que monitorear cambios en el funcionamiento de la biota del suelo permiten anticipar un posible proceso de degradación.

DESCRIPCIÓN DE LAS COMUNIDADES Y COMPARACIÓN ENTRE LOS SISTEMAS

Respuesta de la comunidad de colémbolos a cambios en el ambiente edáfico

Se comenzó el análisis con una comparación de las abundancias (abundancia total de colémbolos) tomando a todos los colémbolos en su conjunto (colémbolos totales). Las abundancias de colémbolos son significativamente mayores en los manejos con mayor influencia antrópica (SM y SA), que en el Pastizal Naturalizado (Fig. 4.8).

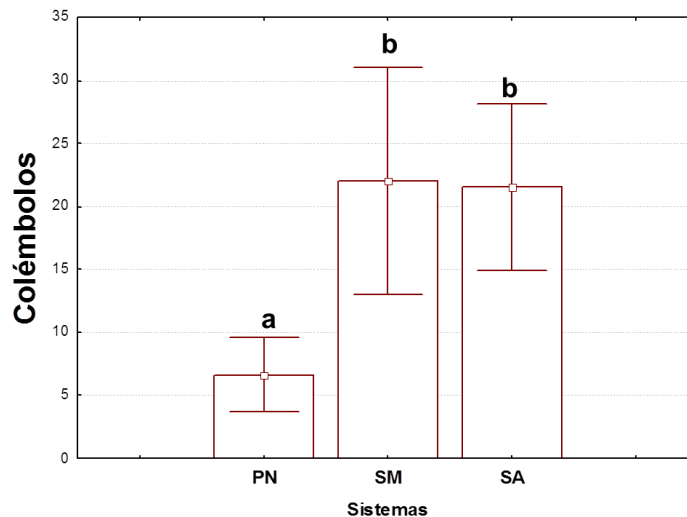





Fig. 4.8: Comparación de las abundancias del orden Collembola. PN: Pastizal naturalizado, SM: sistema mixto, SA: sistema agrícola. Letras distintas entre usos de suelo indican diferencias significativas (Kruskall-Wallis ANOVA, $p < 0,05$).

Este primero resultado, difiere de lo esperado a priori; si bien se separan los sistemas antropizados de los que no lo son tanto, las mayores abundancias se encuentran en los primeros (SM y SA), siendo esto contrario a lo que se esperaba, es decir que el manejo disminuyera las abundancias de este grupo.

Cuando nos adentramos en el análisis de la comunidad de colémbolos se observa que de las familias que se encuentran presentes en Argentina (Momo y Falco, 2009), en los campos analizados en este estudio se encontraron 4 pertenecientes al Orden Arthropleona y una del Orden Symphypleona (Tabla 4.2).

Tabla 4.2: Familias de colémbolos determinadas en el estudio.

FAMILIA
<p data-bbox="220 663 579 696">Onychiuridae (Foto propia)</p> 
<p data-bbox="220 1075 624 1108">Hypogastruridae (Foto propia)</p> 
<p data-bbox="220 1590 552 1624">Isotomidae (Foto propia)</p> 



Entomobryidae (Foto propia)

Katiannidae (Foto propia)


Tabla 4.3: Abundancias de las familias de colémbolos en los sistemas estudiados (individuos totales).

			PN	SM	SA
Orden	Suborden	Familia			
Arthropleona	Poduromorpha	Hypogastruridae	85	560	338
		Onychiuridae	233	245	619
	Entomobryomorpha	Isotomidae	153	754	551
		Entomobryidae	8	19	39
Symphyleona	Eusymphyleona	Katiannidae	1	6	7

En el Pastizal Naturalizado vemos que las familias más abundantes son Onychiuridae e Isotomidae. Las familias Hypogastruridae e Isotomidae son las más abundantes en el Sistema Mixto. Mientras que las familias Onychiuridae e Isotomidae vuelven a ser más abundantes en el Sistema Agrícola.

Comparando los sistemas entre sí, vemos que si bien en los tres se encuentran presentes todas las familias, varían ampliamente sus abundancias dependiendo del sistema que estemos mirando. Esto apoya el hecho de que los colémbolos, y en particular sus familias son útiles como indicadores biológicos ya que el manejo antrópico produce modificaciones en sus abundancias.

En el análisis de cada familia en particular comparándola entre los sistemas vemos que, la familia Hypogastruridae presenta diferencias en sus abundancias entre los sistemas antropizados y el pastizal naturalizado, siendo sus abundancias mayores en los primeros (Fig. 4.9).

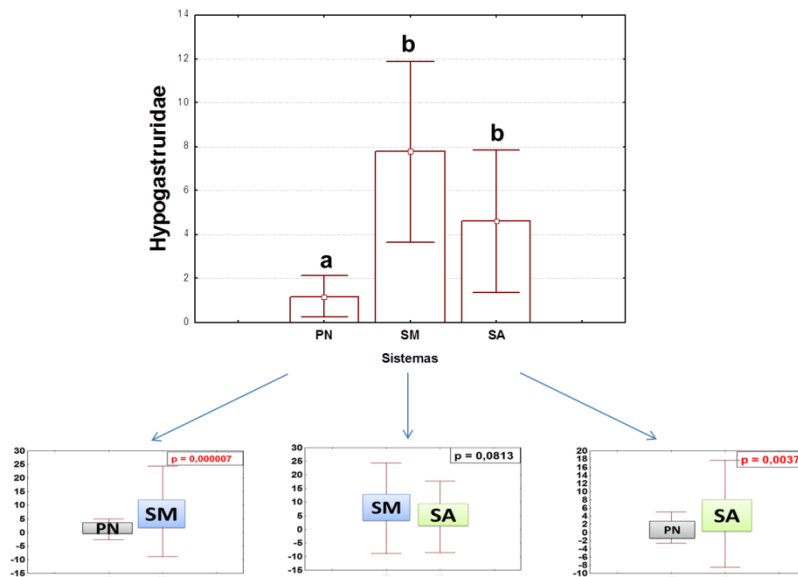


Fig. 4.9. Comparación de las abundancias de la familia Hypogastruridae. PN: Pastizal naturalizado, SM: sistema mixto, SA: sistema agrícola. Letras distintas entre usos de suelo indican diferencias significativas (Kruskall-Wallis ANOVA, $p < 0,05$).

En el caso de la familia Onychiuridae, sus abundancias resultaron ser mayores en el Sistema Agrícola cuando se lo compara con cada uno de los otros sistemas, no presentando diferencias entre los otros dos sistemas (Fig. 4.10).

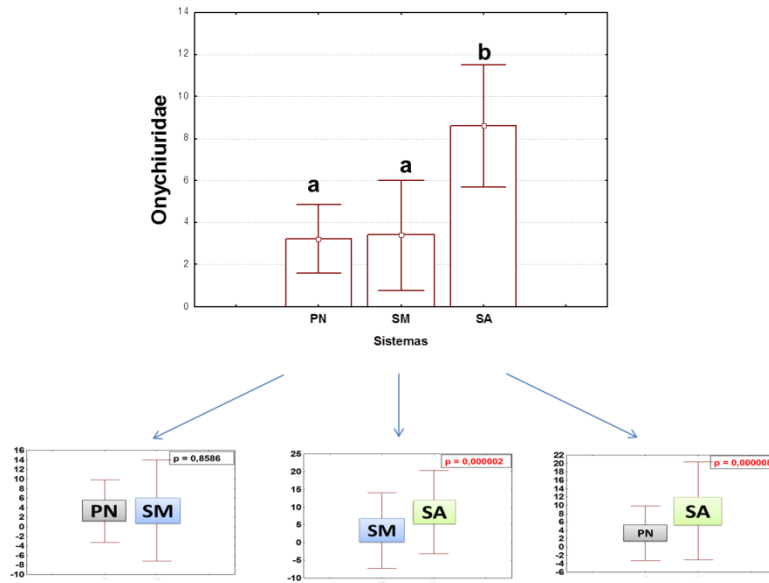


Fig. 4.10: Comparación de las abundancias de la familia Onychiuridae. PN: Pastizal naturalizado, SM: sistema mixto, SA: sistema agrícola. Letras distintas entre usos de suelo indican diferencias significativas (Kruskall-Wallis ANOVA, $p < 0,05$).

Cuando analizamos el comportamiento de la familia Isotomidae, vemos que sus abundancias se diferencian, al igual que la familia Hypogastruridae, entre los sistemas antropizados y el Pastizal Naturalizado, siendo nuevamente más abundantes en los primeros (Fig. 4.11).

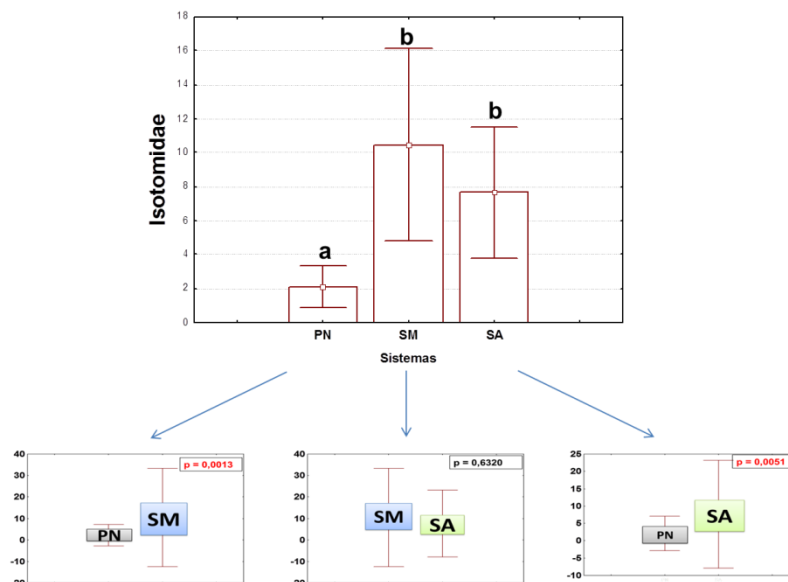


Fig. 4.11: Comparación de las abundancias de la familia Isotomidae. PN: Pastizal naturalizado, SM: sistema mixto, SA: sistema agrícola. Letras distintas entre usos de suelo indican diferencias significativas (Kruskall-Wallis ANOVA, $p < 0,05$).

En el caso de las familias Entomobryidae y Katiannidae presentan el mismo comportamiento, siendo sus abundancias diferentes significativamente entre el Pastizal Naturalizado y el Sistema Agrícola el cual fue el que sufrió un mayor impacto antrópico a lo largo del estudio (Fig. 4.12 y 4.13).

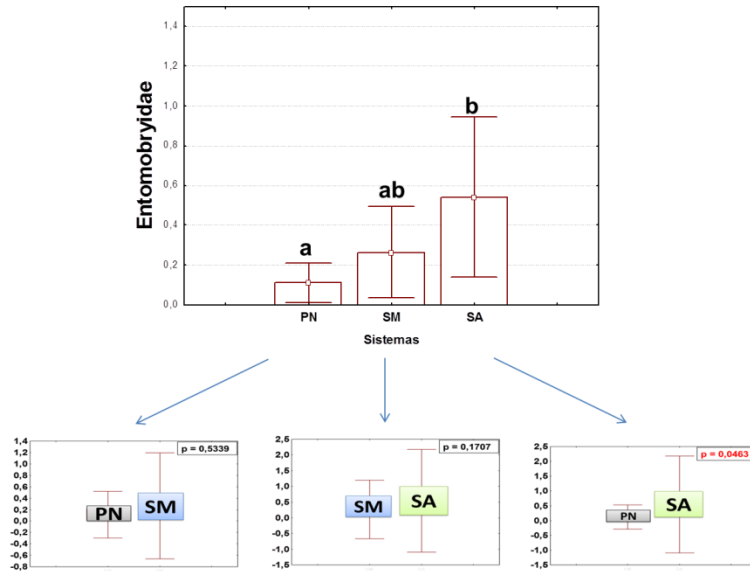


Fig. 4.12: Comparación de las abundancias de la familia Entomobryidae PN: Pastizal naturalizado, SM: sistema mixto, SA: sistema agrícola. Letras distintas entre usos de suelo indican diferencias significativas (Kruskall-Wallis ANOVA, $p < 0,05$).

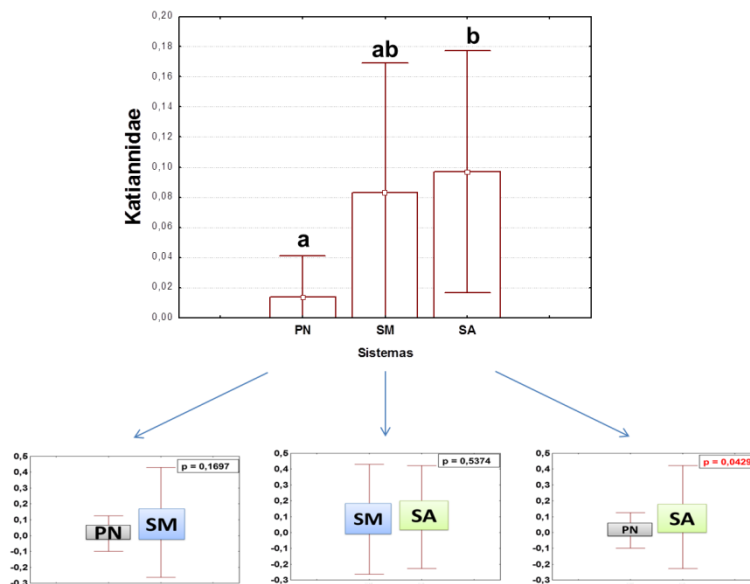


Fig. 4.13: Comparación de las abundancias de la familia Katiannidae. PN: Pastizal naturalizado, SM: sistema mixto, SA: sistema agrícola. Letras distintas entre usos de suelo indican diferencias significativas (Kruskall-Wallis ANOVA, $P < 0,05$).

La Riqueza es igual en los tres sistemas, mientras que la Diversidad de Shannon y la Equitatividad es PN < SM < SA (Tabla 4.4).

Tabla 4.4: Valores de riqueza, Diversidad de Shannon y Equitatividad de colémbolos en los tres sistemas estudiados. PN: Pastizal Naturalizado; SM: Sistema Mixto; SA: Sistema Agrícola.

	PN	SM	SA
Riqueza (S)	5	5	5
Diversidad Shannon (H')	0,9675014	1,0251911	1,0888337
Equitatividad (J = H' / ln S)	0,6011424	0,6369871	0,6765304

La diversidad es menor significativamente entre los suelos no manejados (PN) y los suelos con intervención antrópica (SM y SA) (Kruskal Wallis, p<0.05).

Índice de grado de cambio de la diversidad de sistemas ecológicos

Siguiendo con el análisis de las comunidades y la comparación entre los sistemas, se realizó el cálculo del índice de grado de cambio de la diversidad de sistemas ecológicos. Este índice incluye varios atributos de la comunidad y los agrupa en un índice sintético (Cancela da Fonseca y Sarkar, 1998), el cual analiza cómo cambia una comunidad de organismos de un sistema, tomando como referencia un suelo sin actividad antrópica.

Para el cálculo del grado de cambio de la diversidad entre sistemas, se utilizó la siguiente fórmula (Cancela da Fonseca y Sarkar, 1996 y Cortet et al., 2002):

$$\Delta = [V(\bar{x}) + V(S) + V(n) + V(H_x) + V(H_y)]$$

Donde,

- \bar{x} : abundancia media del grupo taxonómico,
- S: número de grupos taxonómicos,
- n: número de muestras,
- H_x: índice de diversidad α .
- H_y: índice de diversidad de Shannon.

$V_m: (E_m - C_m) / (E_m + C_m)$

C_m : valor del parámetro m del sistema control o de referencia.

E_m : valor del parámetro m del sistema a comparar.

m : parámetros \dot{x} , S , n , H_x o H_y .

El índice varía entre: -1 y +1, siendo -1 cuando el sistema evaluado muestra menor diversidad y +1 cuando es mayor.

El cálculo se realizó entre los tres sistemas tomándolos de a dos, obteniendo así tres índices de grado de cambio, de acuerdo con la metodología propuesta por Cortet et al., 2002.

Los resultados de este análisis muestran que el índice de grado de cambio entre los sistemas SM y PN es positivo, lo que indica que la biodiversidad de colémbolos del suelo medido por este índice es mayor en el sistema mixto. (Tabla 4.5a).

El índice del grado de cambio entre los sistemas SM y SA también es positivo, lo que indica que la biodiversidad de los colémbolos del suelo medido por este índice es mayor en el sistema agrícola. (Tabla 4.5b).

Por último, el índice del grado de cambio entre los ambientes de pastizales y agrícolas es positivo, así, lo que indica que la biodiversidad de los colémbolos del suelo medido por este índice es mayor en el sistema agrícola (Tabla 4.5c).

Tabla 4.5a: Índice del grado de cambio de la diversidad de colémbolos entre el Pastizal Naturalizado y el Sistema Mixto. V: valor del grado de cambio de cada parámetro. X: abundancia del grupo taxonómico, S: número de grupos taxonómicos, n: número de unidades muestrales, Hx: índice de diversidad de grupo (γ), Hy: índice de diversidad de Shannon.

Sistema mixto- Pastizal Naturalizado	V(\dot{x})	V(S)	V(n)	V(Hx)	V(Hy)	ΣV	Δ
feb-09	0.0862	0.5	0	1	0.3944	1.8081	0.3616
may-09	0.5342	0.2	0.0588	0.7890	0.3160	1.8981	0.3796
ago-09	0.9782	0.2	0.6363	0.8198	0.7215	3.3559	0.6711
dic-09	0.6232	0	0	0.1761	0.0161	0.4631	0.0926
mar-10	0.4792	0.1428	0.0588	0.0866	0.0585	0.7084	0.1416
jun-10	0.7048	0	0.1428	0.1409	0.0815	1.0702	0.2140
sep-10	0.8406	0.1428	0.0588	0.3102	0.0977	1.4503	0.2900
dic-10	0.5107	-0.2	0	0.5915	0.2562	0.1370	0.0274
							0.2491

Tabla 4.5b: Índice del grado de cambio de la diversidad de colémbolos entre el Sistema Agrícola y el Sistema Mixto. V: valor del grado de cambio de cada parámetro. X: abundancia del grupo taxonómico, S: número de grupos taxonómicos, n: número de unidades muestrales, Hx: índice de diversidad de grupo (γ), Hy: índice de diversidad de Shannon.

Sistema Agrícola- Sistema Mixto	V(\dot{x})	V(S)	V(n)	V(Hx)	V(Hy)	ΣV	Δ
feb-09	0.5835	-0.20	0.1667	-0.3372	-0.2676	-0.0547	-0.0109
may-09	0.1913	0	-0.1250	0.0276	-0.1551	-0.0612	-0.0122
ago-09	-0.6441	0	-0.0588	-0.4624	-0.1987	-1.3639	-0.2728
dic-09	0.3558	0	0.2308	-0.0640	0.1350	0.6576	0.1315
mar-10	0.2351	0	0.0588	0.2356	0.0619	0.5914	0.1183
jun-10	0.4792	0.1429	0.0588	0.3736	0.2128	1.2673	0.2535
sep-10	-0.3842	0.1111	0.0000	-0.1888	-0.0355	-0.4974	-0.0995
dic-10	0.4479	0.3333	0.0588	0.1816	0.1263	1.1480	0.2296
							0.0422

Tabla 4.5c: Índice del grado de cambio de la diversidad de colémbolos entre el Pastizal Naturalizado y el Sistema Agrícola. V: valor del grado de cambio de cada parámetro. X: abundancia del grupo taxonómico, S: número de grupos taxonómicos, n: número de unidades muestrales, Hx: índice de diversidad de grupo (γ), Hy: índice de diversidad de Shannon.

Sistema Agrícola - Pastizal Naturalizado	V(\bar{x})	V(S)	V(n)	V(Hx)	V(Hy)	ΣV	Δ
feb-09	0.5236	0.3333	0.1667	1	0.1418	2.1653	0.4331
may-09	0.6583	0.2000	-0.0667	0.7993	0.1693	1.7601	0.3520
ago-09	0.9036	0.2000	0.6000	0.5756	0.6103	2.8895	0.5779
dic-09	-0.3436	0.0000	0.2308	0.1135	0.1192	0.1198	0.0240
mar-10	0.6420	0.1429	0.0000	0.3158	0.1200	1.2207	0.2441
jun-10	0.8851	0.1429	0.2000	0.4888	0.2893	2.0062	0.4012
sep-10	0.6743	0.2500	0.0588	0.1290	0.0624	1.1745	0.2349
dic-10	-0.0814	0.1429	0.0588	0.6982	0.3705	1.1890	0.2378
							0.3131

Estos resultados muestran que la diversidad de la comunidad de colémbolos del suelo, según el índice de grado de cambio resultó en un gradiente SA > SM > PN. Esto coincide también con los valores de H' y equitatividad que presentan el mismo gradiente SA > SM > PN.

Discusión

Los resultados muestran que:

- Las abundancias totales fueron mayores en los sistemas antropizados (SM y SA) que en el no antropizado (PN).
- La riqueza a nivel de familia resultó igual en los tres sistemas.
- La diversidad de Shannon (H') fue mayor en los sistemas antropizados (SM y SA) que en el no antropizado (PN).
- El índice de grado de cambio de la diversidad de sistemas ecológicos (Δ) presentó un gradiente: SA > SM > PN.

- Comparando el PN con el SM, las familias Hypogastruridae e Isotomidae son significativamente más abundantes en SM.
- Entre el SM y SA la única familia que presenta diferencias significativas es Onychiuridae, siendo más abundante en SA.
- Entre el PN y SA es donde se encuentran las mayores diferencias siendo significativas al 95 % las familias Onychiuridae, Entomobrydae y Katiannidae y al 90 % Hypogastruridae e Isotomidae. Siempre siendo mayores las abundancias en el SA.

Mundialmente a los Colémbolos se les ha reconocido como unos excelentes bioindicadores del suelo debido a ciertas características de su fauna que los hace especialmente sensibles a los factores ecológicos; teniendo en cuenta estas particularidades algunos autores como Delamare-Deboutteville (1951), Palacios Vargas (1985) establecieron las siguientes características para estos indicadores:

1. Son los animales más numerosos en el suelo, junto con los ácaros.
2. Se reproducen en cualquier época del año, sobre todo cuando las condiciones microclimáticas son adecuadas.
3. Su ciclo vital es muy corto, tan pronto como las condiciones se vuelven favorables, se nota su efecto inmediato sobre la población total, con una rápida respuesta numérica a cambios en las condiciones ambientales.
4. Su respiración es cutánea, por lo tanto, dependen de las variaciones microclimáticas, particularmente de la humedad.

Por estas características los colémbolos pueden ser usados para conocer el impacto antropogénico y pueden indicar el grado de regeneración de los suelos en un gradiente sucesional derivado de la actividad agrícola (Najt, J., 1973; Hermosilla, W., 1978; Vegter et al., 1988). La abundancia de los colémbolos depende en gran medida de la conjugación de los factores materia orgánica y humedad y son susceptibles a las perturbaciones del medio.

Varios autores señalan que los colémbolos son sensibles a los cambios producidos en las condiciones edáficas y pueden ser utilizados como bioindicadores de la salud del suelo (Prat y Massoud, 1980; Pinto et al., 1997; Kovác y Miklisová, 1997; Greenslade, P., 1997; Frampton, G.F., 1994, 1997). Su valor indicador ha sido registrado en diferentes estudios tanto a nivel de especie (Bengtsson et al., 1985; Dunger, W., 1986) como familia (Waikhom et al., 2006).

La bibliografía nos muestra que, la respuesta de la comunidad de colémbolos del suelo a cambios en las prácticas agrícolas es variada, pero en varios casos se ha demostrado que suelos agrícolas tienen baja riqueza de especies, reducción de la diversidad y una disminución en las abundancias. Varios autores como por ejemplo, Edwards, J.R., 1969; Kracht et al., 1997; Bedano et al., 2006, han evidenciado el efecto de las prácticas agrícolas sobre la abundancia de colémbolos, mientras que Cortet et al., 2002 y Culik y Filho, 2003, han encontrado el efecto sobre la diversidad. Los resultados presentados aquí difieren de estas apreciaciones, ya que en los sitios muestreados las mayores abundancias y diversidad se dieron en los campos agrícolas, sitios con un impacto antrópico considerado; mientras que la riqueza a nivel de familia se mantuvo igual en los tres sistemas.

Para Kaneda y Kaneco (2008), los colémbolos prefieren la capa del mantillo porque acceden más fácilmente a sus fuentes de alimento que en el suelo mineral, debido a la estructura del sustrato. También, González et al. (2003), indican que a diferencia de los ácaros, el comportamiento de los colémbolos se interrelaciona más con la presencia de la capa vegetal. Esta situación se justifica por la poca esclerotización de su cuerpo, que prácticamente no los protege de la evaporación en la superficie del cuerpo, y los hace mucho más vulnerables a la insolación que otros habitantes del suelo. Esto puede explicar nuestros resultados, ya que en los campos agrícolas muestreados, luego de la cosecha, se observó una capa muy importante de rastrojo lo que brinda a la comunidad una rica y abundante fuente de alimento, una muy buena regulación de la temperatura y humedad del suelo por debajo de esta capa, así como también protección contra la erosión producida por el viento y el efecto de las gotas de lluvia sobre el suelo.

Con respecto a las abundancias de las familias analizadas, los resultados son discrepantes en algunos casos.

Las familias Onychiuridae y Isotomidae son las más abundantes en el Pastizal Naturalizado como así también en el sistema Agrícola, lo que podría deberse a que son familias generalistas (Hopkin, S., 1997), que son capaces de soportar disturbios producidos por la actividad agrícola o que luego de un disturbio se recuperan rápidamente debido a que presentan una gran resiliencia ecológica.

Reeleder et al. (2006), hallaron que colémbolos de la familia Onychiuridae e Isotomidae no fueron afectados por los tratamientos de labranza empleados. Sus resultados sugieren que el tipo de suelo puede ser una condición que supera los impactos de los sistemas de cultivo en poblaciones de organismos del suelo. González et al. (2003) encontraron en sus estudios, que la familia Isotomidae era superior en número en parcelas con presencia de cobertura vegetal comparado con parcelas sin cobertura. En nuestro estudio los Isotomidos se encuentran en abundancia en los tres sistemas. Esto se atribuye a que sus especies han sido registradas como de gran adaptabilidad a perturbaciones ocasionadas por prácticas agrícolas y forestales, y que tal como lo mencionan Mendoza et al. (1999), pueden proliferar en suelos con bajo o alto contenido de materia orgánica. Dunger et al. (2004), han mostrado la importancia de los Onychiuridos como indicadores, en especial algunas especies, indicadoras de suelos en zonas de baja precipitación, sin exceso de humedad y posibles indicadores de fertilidad.

En relación a la familia Entomobrydae, está compuesta por especies epigeas, que presentan adaptaciones morfológicas para reducir la transpiración de la superficie del cuerpo (escamas, cubierta densa de pelos, intensa pigmentación), que las protegen de condiciones extremas de humedad y temperatura, son las que pueden explicar la abundancia en el sistema agrícola a pesar de ser un sistema con una gran cantidad de prácticas de manejo, que afectan a los colémbolos (Bilde y Toft, 2000).

Según el estudio realizado por Scampini et. al. (2000) la familia Isotomidae y Entomobrydae predominan en el ambiente más afectado por las práctica agrícolas,

mientras que los Hypogastruridae son los más numerosos en las pastizales naturalizados (Scampini et al., 2000).

Todos estos resultados hacen que los colémbolos sigan siendo utilizados por muchos investigadores como indicadores biológicos de calidad del suelo, ya sea por su mayor o menor abundancia o por su mayor o menor diversidad. Los resultados aquí presentados muestran diferencias entre los sistemas, y por lo tanto aportan importante información adicional a la ya existente. Además confirman el hecho de que los colémbolos son sensibles a modificaciones en las condiciones ambientales del suelo, ya que su comunidad mostró diferencias en respuesta a los cambios en las variables físico – químicas, los cuales fueron producidos por las diferentes prácticas de manejo.

Respuesta de la comunidad de ácaros a cambios en el ambiente edáfico

Para el análisis de la comunidad de ácaros, se considero el número total, y se comparó este entre los diferentes sistemas estudiados. Se observó que dichas abundancias presentan diferencias significativas, siendo mayores en el SA (Fig. 4.14).

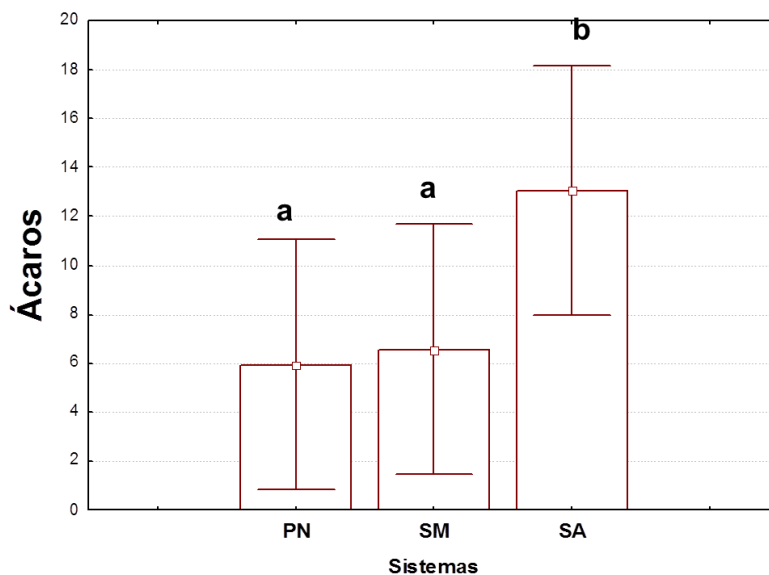


Fig. 4.14: Comparación de las abundancias de Ácaros. PN: Pastizal naturalizado, SM: sistema mixto, SA: sistema agrícola. Letras distintas entre usos de suelo indican diferencias significativas (Kruskal-Wallis ANOVA, $P < 0,05$).

El análisis a nivel de orden, mostró que las densidades de los Oribatidos (Sarcoptiformes) presentaron diferencias significativas entre los tres sistemas estudiados (Fig. 4.15).

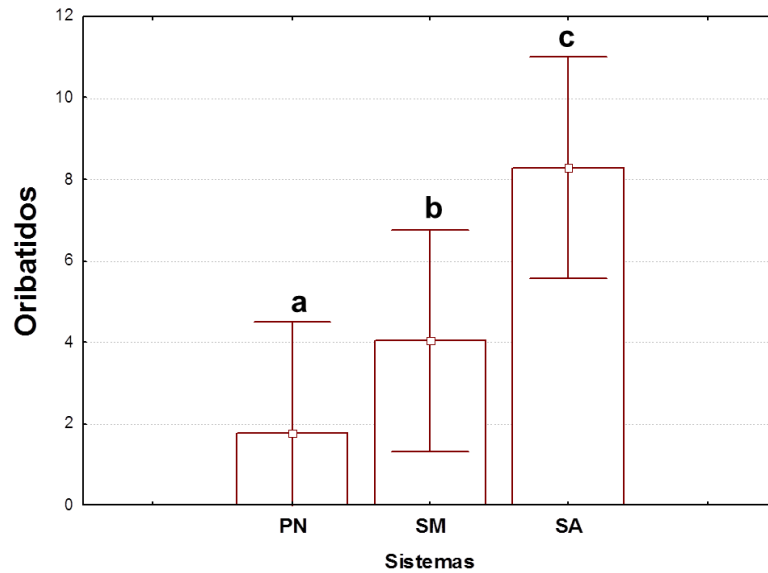


Fig. 4.15: Comparación de las abundancias de Oribatidos. PN: Pastizal naturalizado, SM: sistema mixto, SA: sistema agrícola. Letras distintas entre usos de suelo indican diferencias significativas (Kruskall-Wallis ANOVA, $P < 0,05$).

Los prostigmata (Trombidiformes), presentaron diferencias significativas separando el sistema mixto (de disturbio intermedio) de los otros dos sistemas (Fig. 4.16).

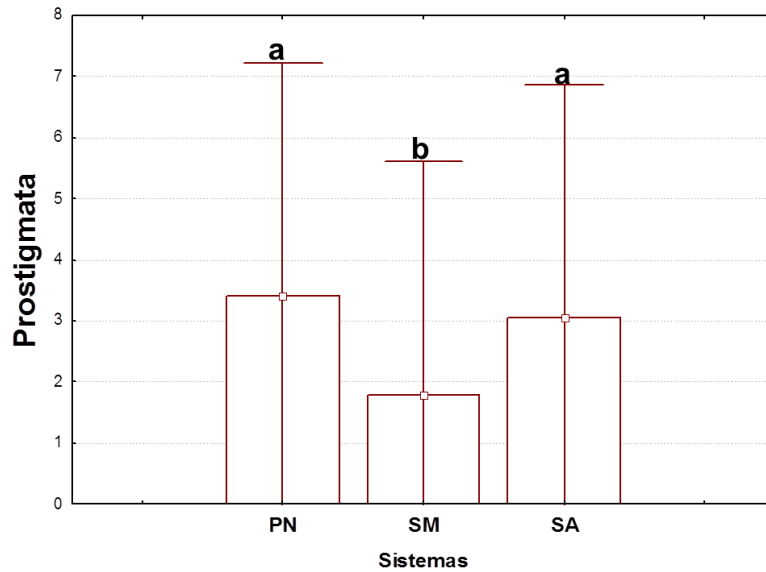



Fig. 4.16: Comparación de las abundancias de Prostigmata. PN: Pastizal naturalizado, SM: sistema mixto, SA: sistema agrícola. Letras distintas entre usos de suelo indican diferencias significativas (Kruskall-Wallis ANOVA, $P < 0,05$).

Los mesostigmata no resultaron significativos, es decir, sus abundancias fueron estadísticamente iguales en los tres sistemas.

Cuando el análisis se realizó a nivel de superfamilia, los resultados son mucho más variables, dependiendo de qué grupo y de qué sistema estemos hablando. A continuación se describen las superfamilias de ácaros encontradas y los análisis realizados.

Tabla 4.6: Superfamilias de ácaros determinadas en el estudio (adaptado de Krantz y Walter, 2009).

SUPER FAMILIA
Dermanyssoidea (Foto propia) <div style="text-align: center; margin-top: 10px;">  </div>

Rhodacaroidea (Foto propia)



Veigaiioidea (Foto de Scott Justis, <https://bugguide.net>)



Parasitoidea (Foto propia)



Uropodoidea (Foto de Debbi Brusco, <https://bugguide.net>)



Paratydeoidea (Foto Alexander A. Khaustov, <https://zenodo.org>)



Bdelloidea (Foto propia)



Tydeoidea (Foto propia)



Tetranychidae (Foto propia)



Scutacaridae (Foto Matthew Shepherd,
<http://www.soilbiodiversityuk.myspecies.info>)



Trombididae (Foto propia)



Brachychthonoidea (Foto Ricardo Castro Huerta)



Eulohmannioidea (Foto de Matthew Shepherd,
<http://www.soilbiodiversityuk.myspecies.info>)



Lohmannioidea (Foto de Christopher Taylor,
<http://taxondiversity.fieldofscience.com>)



Euphthiracaroida (Foto de Susan Leach Snyder,
<https://bugguide.net>)



Crotoniidea (Foto propia)



Hermannioidea (Foto de Matthew Shepherd,
<http://www.soilbiodiversityuk.myspecies.info>)



Oppioidea (Foto propia)



Hydrozetoidea (Foto de Calico Kitties, <https://bugguide.net>)



Galumnoidea (Foto propia)



Oripodoidea (Foto propia)



Ceratozetoidea (Foto de Matthew Shepherd,
<http://www.soilbiodiversityuk.myspecies.info>)



Oribatelloidea (Foto propia)



Parhypochothonioidea (Foto Norton & Behan-Pelletier, 2009, A
Manual of Acarology).



Acaroidea (Foto propia)



Tabla 4.7: Abundancias de cada superfamilia de ácaros en los sistemas estudiados (individuos totales). PN: Pastizal naturalizado, SM: sistema mixto, SA: sistema agrícola.

					PN	SM	SA
Orden	Suborden	Cohorte	Subcohorta	Superfamilia			
Mesostigmata	Monogynaspida	Gamasina	Dermanissyna	Dermanyssoidea	18	22	17
				Rhodacaroidea	26	5	82
				Veigaiioidea	10	0	20
			Parasitiae	0	11	0	
		Uropodina	Uropodiae	Uropodoidea	0	0	4
Trombidiforme	Prostigmata	Anystina		Paratydeoidea	0	2	1
		Parasintengonina	Trombidiae	Trombidioidea	3	0	0
		Eupodides		Bdelloidea	237	88	167
				Tydeoidea	6	31	51
		Raphignathina		Tetranychoidea	0	0	1
Heterostigmatina		Scutacaroidea	0	8	0		
Sarcoptiformes	Oribatidos	Enarthronota		Brachychthonoidea	22	1	11
		Mixonomata		Eulohmannioidea	0	2	0
				Lohmannioidea	10	36	14
				Euphthiracaroidea	1	0	11
		Nothrina		Crotonioidea	5	6	17
				Hermannioidea	0	0	2
		Brachypylina		Oppioidea	20	48	81
Hydrozetoidea	0			3	0		

			Galumnoidea	8	9	9
			Oripodoidea	52	123	397
			Ceratozetoidea	1	0	1
			Oribatelloidea	0	0	1
		Parhyposomata	Parhypochthonioidea	8	62	53
		Astigmata	Acaroidea	0	15	0

La Tabla 4.7 muestra la lista de superfamilias de ácaros encontradas en cada uno de los sistemas y sus abundancias. Se encontraron un total de 25 superfamilias, de 4 órdenes diferentes.

De un total de 25 superfamilias, solo 11 estuvieron presentes en los tres sistemas: Dermanyssoide, Rhodacaroidea, Bdelloidea, Tydeoidea, Brachychthonoidea, Lohmannioidea, Crotonioidea, Oppioidea, Galumnoidea, Oripodoidea y Parhypochothonioide.

Del resto de las superfamilias algunas se encontraron en dos de los sistemas: Veigaioida, Euphthiracaroidea, Ceratozetoidea en el pastizal naturalizado y el sistema agrícola; Paratydeoidea en el sistema mixto y agrícola.

Pero también algunas se encontraron solo en uno de los sistemas:

La superfamilia Trombioidea se encontró solo en el pastizal, 5 superfamilias se encontraron solo en el sistema mixto, de las cuales una es Mesostigmata (Parasitoidea), una Trombidiforme (Scutacaroidea), dos Oribátidos (Eulohmannioidea y Hidrozetoidea) y una Astigmata (Acaroidea) y 5 superfamilias se encontraron en el sistema agrícola de las cuales una es Mesostigmata (Uropodoidea), una Trombidiforme (Tetranychoida) y dos Oribátidos (Hermannioidea y Oribatelloidea).

De las 11 superfamilias compartidas entre los tres sistemas, las que presentaron diferencias significativas al 95 % en sus abundancias son Rhodacaroidea, Oppioidea, Oripodoidea, Bdelloidea y Lohmannioidea, mientras que Crotonioidea lo hizo al 90 %.

La abundancia de la superfamilia Rhodacaroidea presentó diferencias significativas entre los tres sistemas. Las mayores abundancias se presentaron en el SA, seguido por el PN y en último lugar el SM (Fig. 4.17).

La superfamilia Oppiidae presentó diferencias entre el PN y los sistemas antropizados, siempre siendo mayores en estos últimos. Pero no presentaron diferencias sus abundancias entre los SM y SA (Fig. 4.18).

La superfamilia Oripodoidea presentó diferencias entre PN y SA y entre SM y SA siendo mayor la abundancia en SA. En cambio no presentó diferencias entre PN y SM (Fig. 4.19).

La superfamilia Bdelloidea presentó mayor abundancia en PN con respecto a SM y a SA, pero no presentó diferencias entre los sistemas antropizados (SM y SA) (Fig. 4.20).

La superfamilia Lohmannioidea presentó mayor abundancia en SM con respecto a PN y SA, pero no presentó diferencias entre PN y SA (Fig. 4.21).

La superfamilia Crotonoidea se comportó de manera similar a la superfamilia Oripodoidea ya que presentó diferencias entre PN y SA y entre SM y SA siendo mayor las abundancias en SA, pero el nivel de significancia fue de 0,1. En cambio no presentó diferencias entre PN y SM.

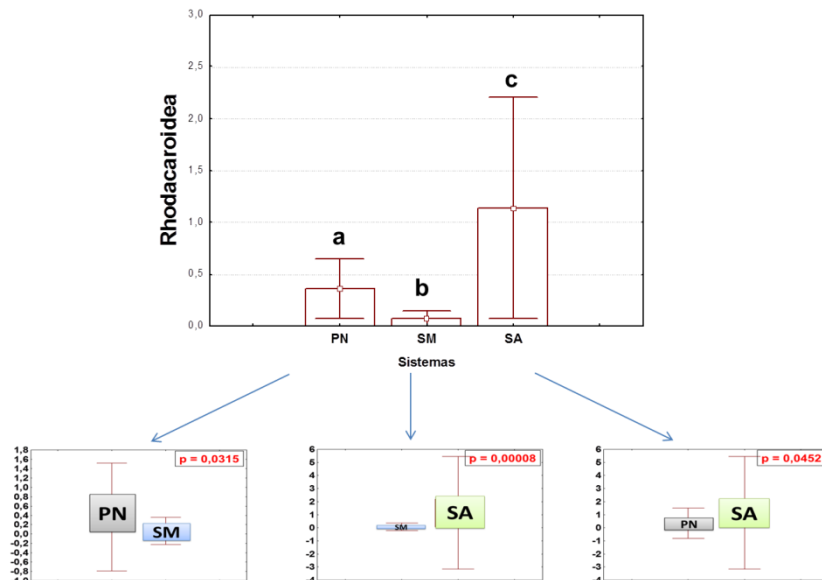


Fig. 4.17: Comparación de las abundancias de Rhodacaroides. PN: Pastizal naturalizado, SM: sistema mixto, SA: sistema agrícola. Letras distintas entre usos de suelo indican diferencias significativas (Kruskal-Wallis ANOVA, $P < 0,05$).

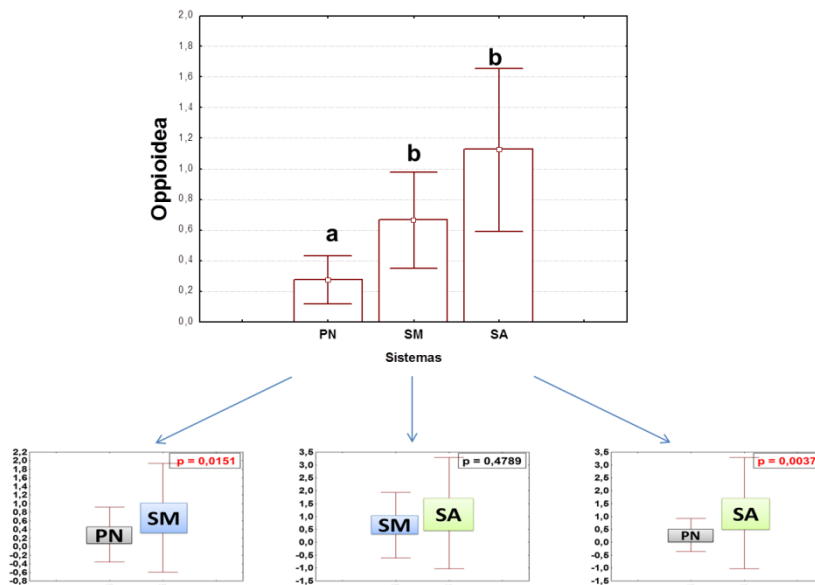


Fig. 4.18: Comparación de las abundancias de Opilioidea. PN: Pastizal naturalizado, SM: sistema mixto, SA: sistema agrícola. Letras distintas entre usos de suelo indican diferencias significativas (Kruskall-Wallis ANOVA, $P < 0,05$).

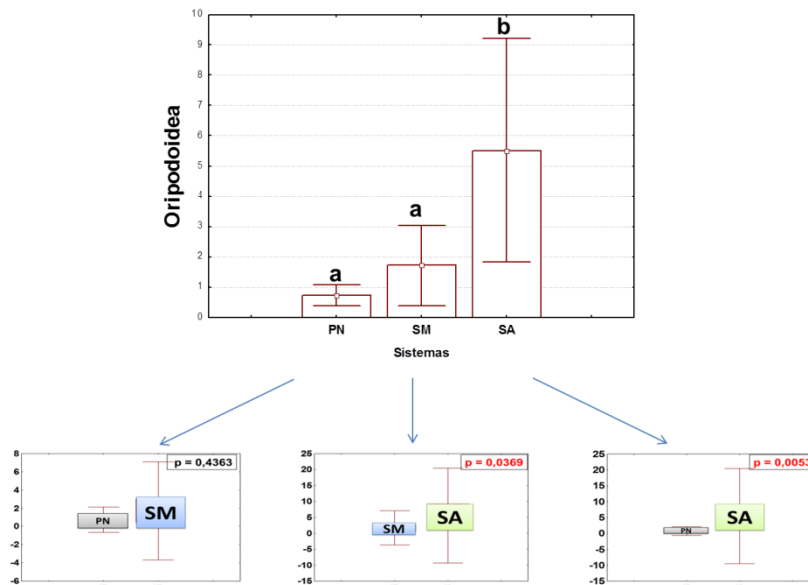


Fig. 4.19: Comparación de las abundancias de Oripodoidea. PN: Pastizal naturalizado, SM: sistema mixto, SA: sistema agrícola. Letras distintas entre usos de suelo indican diferencias significativas (Kruskall-Wallis ANOVA, $P < 0,05$).

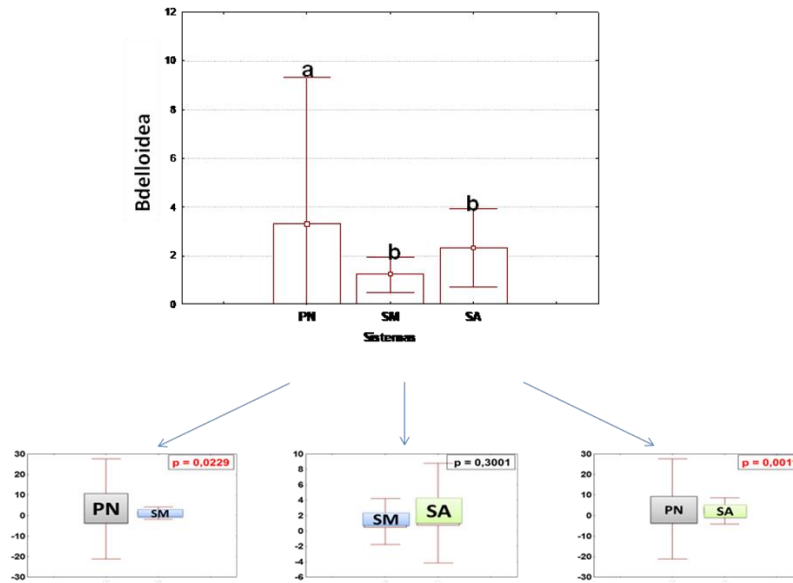


Fig. 4.20: Comparación de las abundancias de Bdelloidea. PN: Pastizal naturalizado, SM: sistema mixto, SA: sistema agrícola. Letras distintas entre usos de suelo indican diferencias significativas (Kruskall-Wallis ANOVA, $P < 0,05$).

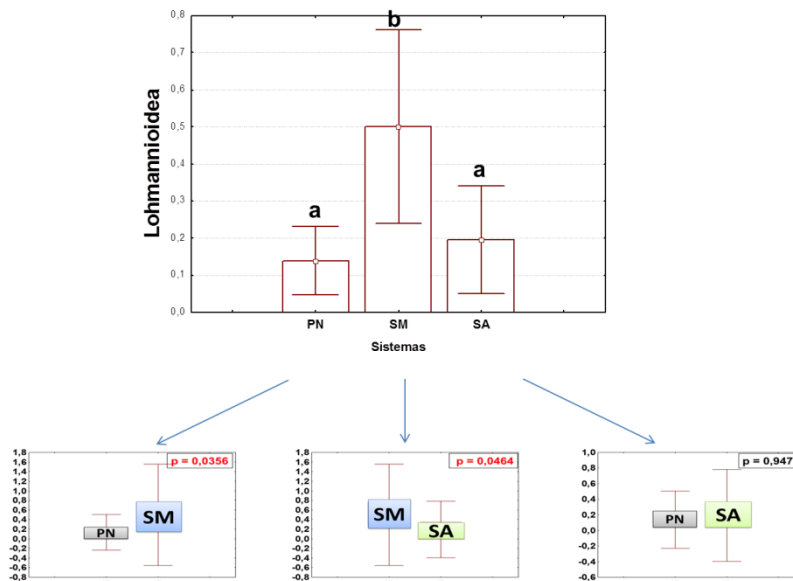


Fig. 4.21: Comparación de las abundancias de Lohmannioidea. PN: Pastizal naturalizado, SM: sistema mixto, SA: sistema agrícola. Letras distintas entre usos de suelo indican diferencias significativas (Kruskall-Wallis ANOVA, $P < 0,05$).

Tabla 4.8: Valores de Riqueza, Diversidad de Shannon y Equitatividad de ácaros en los tres sistemas agrícolas estudiados. PN: Pastizal Naturalizado; SM: Sistema Mixto; SA: Sistema Agrícola.

	PN	SM	SA
Riqueza (S)	15	17	20
Diversidad Shannon (H')	1,6735735	1,9403010	1,7910931
Equitatividad (J = H' / ln S)	0,6179995	0,6848411	0,5978816

Como vemos en la Tabla 4.8 el que presentó mayor riqueza es el Sistema Agrícola y el que presentó mayor diversidad es el Sistema Mixto, siendo siempre el Pastizal Naturalizado el que presentó menores valores. La diversidad es diferente significativamente entre los suelos no manejados (PN) y los suelos con intervención antrópica (SM y SA) (Kruskal Wallis, $p < 0.05$).

Índice de grado de cambio de la diversidad de sistemas ecológicos: ácaros

Los resultados de este análisis muestran que el índice de grado de cambio entre los sistemas SM y PN es positivo, lo que indica que la biodiversidad de ácaros del suelo medido por este índice es mayor en el sistema mixto (Tabla 4.9a).

El índice del grado de cambio entre los sistemas SM y SA también es positivo, lo que indica que la biodiversidad de los ácaros del suelo medido por este índice es mayor en el sistema agrícola (Tabla 4.9b).

Por último, el índice del grado de cambio entre los sistemas de pastizal y agrícola es positivo, lo que indica que la biodiversidad de los ácaros del suelo medido por este índice es mayor en el sistema agrícola (Tabla 4.9c).

Estos resultados muestran que la diversidad de la comunidad de ácaros del suelo, según el índice de grado de cambio resultó en un gradiente SA > SM > PN. Esto coincide con los resultados para los colémbolos.

Tabla 4.9a: Índice del grado de cambio de la diversidad entre el Pastizal Naturalizado y el Sistema Mixto. V: valor del grado de cambio de cada parámetro. X: abundancia del grupo taxonómico, S: número de grupos taxonómicos, n: número de unidades muestrales, Hx: índice de diversidad de grupo (γ), Hy: índice de diversidad de Shannon.

Sistema Mixto - Pastizal Naturalizado	V(x̄)	V(S)	V(n)	V(Hx)	V(Hy)	Σ V	Δ
feb-09	-0,1034	-0,1429	0	-0,2534	-0,1778	-0,6775	-0,1355
may-09	0,5094	0,25	0,20	0,2981	0,2552	1,5127	0,3025
ago-09	0,8696	0,7143	0,6364	0,8138	0,8364	3,8704	0,7741
dic-09	0,0698	-0,1667	0	-0,1538	-0,1761	-0,4268	-0,0854
mar-10	0,6173	0,0909	0	0,2015	0,0961	1,0057	0,2011
jun-10	0,5914	0,1429	0,0769	-0,0874	0,1160	0,8398	0,1680
sep-10	0,6034	0,25	0,1250	0,4310	0,5877	1,9972	0,3994
dic-10	-0,7962	-0,4286	-0,1250	-0,4658	-0,5256	-2,3411	-0,4682
							0,1445

Tabla 4.9b: Índice del grado de cambio de la diversidad entre el Sistema Agrícola y el Sistema Mixto. V: valor del grado de cambio de cada parámetro. X: abundancia del grupo taxonómico, S: número de grupos taxonómicos, n: número de unidades muestrales, Hx: índice de diversidad de grupo (γ), Hy: índice de diversidad de Shannon.

Sistema Agrícola - Sistema Mixto	V(x̄)	V(S)	V(n)	V(Hx)	V(Hy)	Σ V	Δ
feb-09	0,1034	0	0,1667	0,0893	0,1068	0,4663	0,0933
may-09	-0,2698	-0,1111	0	-0,0937	-0,1905	-0,6652	-0,1330
ago-09	-0,2286	-0,3333	-0,20	-0,3978	-0,4636	-1,6233	-0,3247
dic-09	0,3083	0,0909	0,0588	0,1086	0,0453	0,6119	0,1224
mar-10	0,2861	0	0,0588	0,1652	0,3133	0,8234	0,1647
jun-10	0,2449	0,3333	0,0667	0,4633	0,3030	1,4112	0,2822
sep-10	0,50	0,3333	-0,1250	0,1368	-0,0764	0,7687	0,1537
dic-10	0,6503	0,5556	0	0,4404	0,5129	2,1592	0,4318
							0,0988

Tabla 4.9c: Índice del grado de cambio de la diversidad entre el Pastizal Naturalizado y el Sistema Agrícola. V: valor del grado de cambio de cada parámetro. X: abundancia del grupo taxonómico, S: número de grupos taxonómicos, n: número de unidades muestrales, Hx: índice de diversidad de grupo (γ), Hy: índice de diversidad de Shannon.

Sistema Agrícola - Pastizal Naturalizado	V(x̄)	V(S)	V(n)	V(Hx)	V(Hy)	Σ V	Δ
feb-09	0	-0,1429	0,1667	-0,1679	-0,0723	-0,2164	-0,0433
may-09	0,2778	0,1429	0,20	0,2103	0,0679	0,8989	0,1798
ago-09	0,80	0,50	0,50	0,6152	0,6089	3,0240	0,6048
dic-09	0,3701	-0,0769	0,0588	-0,0460	-0,1318	0,1742	0,0348
mar-10	0,7678	0,0909	0,0588	0,3548	0,3974	1,6698	0,3340
jun-10	0,7305	0,4545	0,1429	0,3918	0,4048	2,1245	0,4249
sep-10	0,8477	0,5385	0	0,5361	0,5354	2,4576	0,4915
dic-10	-0,3025	0,1667	-0,1250	-0,0319	-0,0173	-0,3102	-0,0620
							0,2456

Discusión

Los **ácaros** del suelo presentan una gran elevada diversidad y los conocimientos sobre su biología, su diversidad funcional y su hábitat, son escasos comparándolos con otros grupos taxonómicos. Por este motivo, cualquier nuevo conocimiento que pueda aportarse es de suma importancia para poder seguir contribuyendo al entendimiento de un grupo de organismos ecológicamente tan importante.

Los resultados de esta tesis indican claramente que un mismo suelo sometido a distintas intensidades de uso muestra diferencias en la estructura de la comunidad de ácaros presentes. En particular, todas las aproximaciones utilizadas en esta tesis, muestran que la comunidad de ácaros es capaz de mostrar diferencias entre sistemas naturalizados y sistemas con impacto antrópico.

- Las abundancias totales presentaron diferencias siendo mayores en el Sistema Agrícola.
- A nivel taxonómico de orden, el análisis nos muestra que presentan diferencias significativas los Oribatidos (Sarcoptiformes), estando sus mayores abundancias

en el SA, y los Prostigmata presentando mayores abundancias en los sistemas PN y SA, mientras que los mesostigmata no presentan diferencias.

- El sistema de menor impacto antrópico PN, tiene la menor riqueza a nivel de superfamilias. Más aún, la mayor riqueza se encontró en el SA, de mayor intensidad de perturbación.
- La diversidad H' presentó un gradiente, siendo éste: $SM > SA > PN$.
- El índice de grado de cambio de la diversidad de sistemas ecológicos (Δ) calculado para los ácaros presentó un gradiente: $SA > SM > PN$.
- Familia exclusiva del PN: Trombidioidea.
- Familias exclusivas de SM: Parasitoidea, Scutacaroida, Eulohmannioidea, Hydrozetoidea, Acaroidea.
- Familias exclusivas de SA: Uropodoidea, Tetranychoida, Hermannioidea, Oribatelloidea.
- Presentes en los tres sistemas: Dermanyssoidea, Rhodacaroida, Bdelloidea, Tydeoidea, Brachychthonoidea, Lohmannioidea, Crotonoidea, Oppioidea, Galumnoidea, Oripodoidea y Parhypochothonioidea.
- Las superfamilias que están presentes en los tres sistemas y presentan diferencias entre ellos son: Rhodacaroida, Bdelloidea, Lohmannioidea, Crotonoidea, Oppioidea y Oripodoidea.
- Abundancia de Rhodacaroida: $SA > PN > SM$.
- Abundancias de Oppioidea, Oripodoidea, Crotonoidea: $SA > SM > PN$.
- Abundancia de Bdelloidea: $PN > SA > SM$.
- Abundancia de Lohmannioidea: $SM > SA > PN$.
- Presentes PN y SA: Veigaioida, Euphthiracaroida y Ceratozetoidea.

- Presentes en SM y SA: Paratydeoidea.

Si bien las abundancias totales de ácaros presentaron diferencias entre los sistemas, siendo mayor en el sistema agrícola, este criterio no expone claramente la situación en que se encuentra el suelo, al ser los ácaros un grupo que involucra en sí mismo grupos indicadores de fertilidad (oribátidos y mesostigmata) y de infertilidad (prostigmata y astigmata), por lo que su dominancia no muestra la situación real del medio y por tal motivo se continuó el análisis clasificando los organismos al siguiente nivel taxonómico.

Los oribátidos son considerados según varios estudios buenos indicadores de la condición del suelo. El efecto de la agricultura en los oribátidos se ha demostrado que es negativo, ya que son particularmente vulnerables a los disturbios (Behan-Pelletier, V., 1999; Bedano et al., 2006). Su vulnerabilidad es debido a su bajo índice metabólico, bajo desarrollo y su baja fecundidad, los cuales no pueden responder rápidamente a los flujos de los recursos causados por los pulsos de la productividad primaria (Behan-Pelletier, V., 1999). La mayoría de los estudios coinciden en que los oribátidos generalmente están bien adaptados a hábitats con elevada humedad y son susceptibles a la sequía (Gergócs y Hufnagel, 2009). La sequía disminuye la riqueza de especies de oribátidos, mientras que la irrigación incrementa la diversidad de este grupo (Tsiafouli et al., 2005). Los oribátidos son más sensibles y poseen más capacidad de regeneración comparados con los Mesostigmata (Lindberg y Bengtsson, 2006).

Su abundancia constituye un buen indicador ya que son máximos en los sistemas menos antropizados y son sensibles a perturbaciones que ocurren en los suelos y más abundantes en zonas donde existe una mayor acumulación de hojarasca y de materia orgánica (Rockett, C.L., 1986; Behan Pelletier, V., 1999).

Muchos de los resultados presentes en la bibliografía, difieren con los obtenidos en esta tesis, ya que la mayor abundancia de oribátidos en los sistemas estudiados la presento el SA, lo cual coincide con las conclusiones obtenidas con el análisis de la comunidad de colémbolos, en las cuales se postula la posibilidad de que

los manejos empleados en nuestros sitios de muestreos, son prácticas conservacionistas que permiten mantener buenas condiciones edáficas para el desarrollo de la edafofauna, como una mayor acumulación de hojarasca y de materia orgánica.

Con respecto a los Mesostigmata, Hågvar (1984) planteó que este grupo de ácaros es sensible a los suelos perturbados y a los cambios desfavorables en las precipitaciones y a la humedad del suelo, lo que podría deberse a la fragilidad de su cuerpo. Son más abundantes en suelos húmedos, ricos en materia orgánica y relativamente estables (Hutson y Veitch, 1983). Esta característica los hace ser un buen indicador de la calidad de los suelos al presentar una mayor abundancia en aquellos que se encuentran menos perturbados. En este análisis seguimos difiriendo con la mayoría de estos estudios ya que las abundancias de los mesostigmata no fueron mayores en el Pastizal naturalizado además de no presentar diferencias con los sistemas antropizados.

Los Prostigmata (Trombidiforme) son buenos indicadores de inestabilidad y falta de fertilidad del suelo. Son dominantes en suelos pobres en nutrientes y con bajos valores de carbonato de calcio, bajo contenido de materia orgánica y poca humedad (Socarras, A., 2013). En su gran mayoría son depredadores, con estructura frágil y pequeño tamaño, por lo que presumiblemente tienen una notable sensibilidad ante las fluctuaciones de las condiciones hídricas del sustrato (Andrés, P., 1990). Son más abundantes en áreas perturbadas debido a que tienen un alto potencial reproductivo; esto les permite adaptarse al efecto del factor perturbador, por lo que, en ausencia relativa de depredadores y competidores por el alimento, pueden aumentar rápidamente en número (Socarras, A., 2013). En este estudio los resultados muestran mayores abundancias en PN y SA, y no coinciden con las condiciones edáficas propuestas por Socarras (2013).

La bibliografía disponible para muchas de estas superfamilias es más escasa y por tal motivo la información que aportan los resultados obtenidos en la presente tesis es muy valiosa.

Los resultados muestran una variedad de respuestas bastante amplia dependiendo de la superfamilia que se observe. En algunos casos los resultados de esta tesis coinciden con la bibliografía encontrada y en otros difieren. Inclusive en la bibliografía se han encontrado diferentes resultados dependiendo de la superfamilia estudiada.

En el caso de la superfamilia Oppioidea, que en este estudio fue más abundante en SA y menos en PN, Berch et al. (2007) la consideran como indicadora de perturbación en los pastizales y los agroecosistemas, y pionera al colonizar áreas agrícolas. Lo mismo ocurre con la superfamilia Galumnoidea, la cual es tolerante a las fluctuaciones ambientales según Norton (1994), confirmado en este estudio donde no hay diferencias entre los ambientes en las abundancias de este grupo.

Por otro lado, también según Norton (1994) las superfamilias Oripodoidea y Oribatelloidea responden a las prácticas agrícolas de forma predecible y se pueden usar para conocer el estado de degradación del suelo. En este caso los resultados muestran una mayor abundancia de Oripodoideos en el SA, lo que puede ser otro indicio de las condiciones ambientales del sistema agrícola particular utilizado en esta tesis.

Algunos taxones pertenecientes al orden de los oribátidos parecen tener más potencial en estudios de biodiversidad debido a sus altas abundancias, son fácilmente identificables y/o se conocen mejor a nivel de especie (Hunt, G.S., 1994). Oppioidea, Oribatelloidea, Galumnoidea y Brachychthonoidea pueden ser útiles en la evaluación de la biodiversidad y como bioindicadores debido a sus sensibilidades particulares (Hunt, G.S., 1994). Sin embargo, Aoki (1979) considera algunas superfamilias de

oribátidos (Oppiidae, Oribatulidae, Haplozetidae y Galumnidae) como insensibles a las condiciones ambientales.





Otra superfamilia de ácaros con una distribución menos restringida es Ceratozetoidea, la cual aparece bosques y pastizales, y está considerada de baja densidad en agroecosistemas y ecosistemas alterados por la actividad antrópica (Norton, R., 1994). En este caso esta superfamilia resultó un grupo raro en los tres ambientes, y no se la encontró en el SM.

Uropodoidea (Mesostigmata) la cual según Socarras y Robaina (2011) necesita abundante materia orgánica y humedad para el establecimiento y desarrollo de sus poblaciones, en este caso sólo estuvo presente en el SA, lo que podría dar una pauta de las condiciones ambientales de este sistema, es decir, suelos húmedos, ricos en materia orgánica y relativamente estables.

Respuesta de la comunidad de lombrices a cambios en el ambiente edáfico

Las lombrices, a diferencia de los colémbolos y los ácaros, presentan una taxonomía más simple y una menor riqueza, por lo que en esta comunidad se logró determinar los organismos al nivel de especie. Un total de 8 especies fueron identificadas entre los 3 sistemas, siendo 5 de ellas especies exóticas y 3 especies nativas (Tabla 4.10).

Tabla 4.10: Especies de lombrices determinadas en el estudio.

Especie
<p data-bbox="236 365 555 398"><i>Aporrectodea caliginosa</i></p>  A photograph of a pinkish-brown earthworm, <i>Aporrectodea caliginosa</i> , curled in a loose S-shape on a dark, moist soil surface with some small stones and organic matter.
<p data-bbox="236 719 347 752"><i>A. rosea</i></p>  A photograph of a reddish-brown earthworm, <i>A. rosea</i> , lying on a bed of dry, brown leaves and soil.
<p data-bbox="236 1072 411 1106"><i>A. trapezoide</i></p>  A photograph of a dark brown earthworm, <i>A. trapezoide</i> , curled on a plain, light-colored surface.
<p data-bbox="236 1426 507 1460"><i>Octolasion cyaneum</i></p>  A photograph of a pinkish-purple earthworm, <i>Octolasion cyaneum</i> , curled on a dark, moist soil surface.

O. lacteum



Microscolex dubius



M. phosphoreus



Eukerria stagnalis



Tabla 4.11: Abundancias de cada especie de lombriz en los sistemas estudiados (individuos totales).

			PN	SM	SA
Orden	Familia	Especie			
Opisthopora	Lumbricidae	<i>Aporrectodea caliginosa</i>	14	8	137
		<i>A. rosea</i>	39	46	56
		<i>A. trapezoide</i>	12	0	31
		<i>Octolasion cyaneum</i>	26	3	19
		<i>O. lacteum</i>	13	3	1
	Acanthodrilidae	<i>Microscolex dubius</i>	66	5	12
		<i>M. phosphoreus</i>	8	2	0
	Ocnerodrilidae	<i>Eukerria stagnalis</i>	0	138	0

Del total de 8 especies que fueron identificadas entre los 3 sistemas (Tabla 4.11), cinco especies fueron encontradas en todos ellos: la nativa *Microscolex dubius* y las exóticas *Aporrectodea caliginosa*, *A. rosea*, *Octolasion cyaneum* y *O. lacteum*, pero difieren en sus abundancias.

En el PN la especie identificada como dominante fue la epigeica nativa *M. dubius*, seguidas por las endogeicas *A. rosea*, *O. cyaneum*. Las especies endogeica exótica, *O. lacteum*, *A. caliginosa* y *A. trapezoides*, y la nativa *M. phosphoreus*, fueron menos frecuentes (Fig. 4.22).

En el SM la especie endogeica nativa *Eukerria stagnalis* fue dominante y la exótica *A. rosea* fue también común. Otras especies presentes también en este sistema, pero en menor frecuencia fueron: *A. caliginosa*, *O. lacteum*, *O. cyaneum* *M. dubius* y *M. phosphoreus*. En este sistema, *E. stagnalis* representó el 67% de todos los individuos colectados y *A. rosea* representó el 23% (Fig. 4.23).

En el SA, las especies más comunes fueron las exóticas endogeicas *A. caliginosa*, *A. rosea*, y *A. trapezoides*. Las especie endogeica *O. cyaneum* y *O. lacteum*, y la nativa epigeica *M. dubius* fueron menos frecuentes. Aquí, las especies exóticas representan el 95 % de los individuos, siendo *M. dubius* la única nativa presente en este sistema (Fig. 4.24).

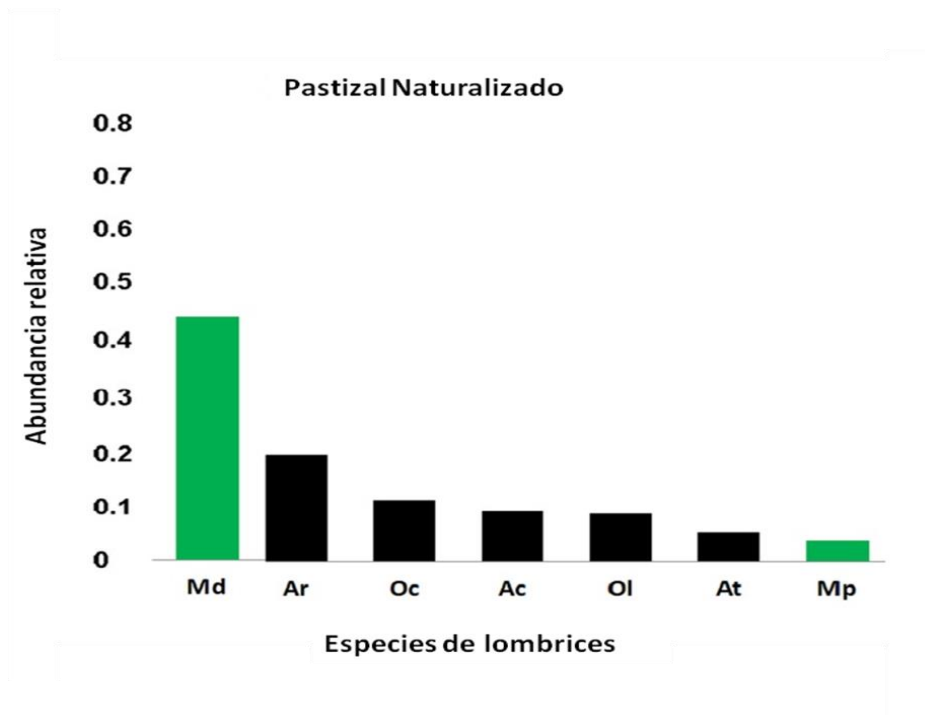


Fig. 4.22: Abundancia relativa de las especies de lombrices en el Pastizal Naturalizado. *Microscolex dubius* (Md), *Aporrectodea rosea* (Ar), *Octalasion cyaneum* (Oc), *Aporrectodea caliginosa* (Ac), *Octalasion lacteum* (Ol), *Aporrectodea trapezoides* (At) y *Microscolex phosphoreus* (Mp). Color verde indica especie nativa y color negro indica especie exótica.

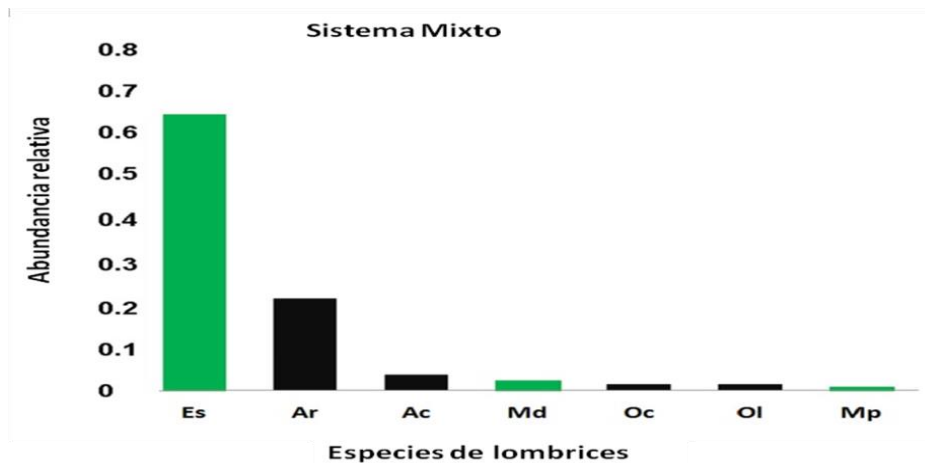


Fig. 4.23: Abundancia relativa de las especies de lombrices en el Sistema Mixto. *Eukerria stagnalis* (Es), *Aporrectodea rosea* (Ar), *Aporrectodea caliginosa* (Ac), *Microscolex dubius* (Md), *Octalasion cyaneum* (Oc), *Octalasion lacteum* (Ol), y *Microscolex phosphoreus* (Mp). Color verde indica especie nativa y color negro indica especie exótica.

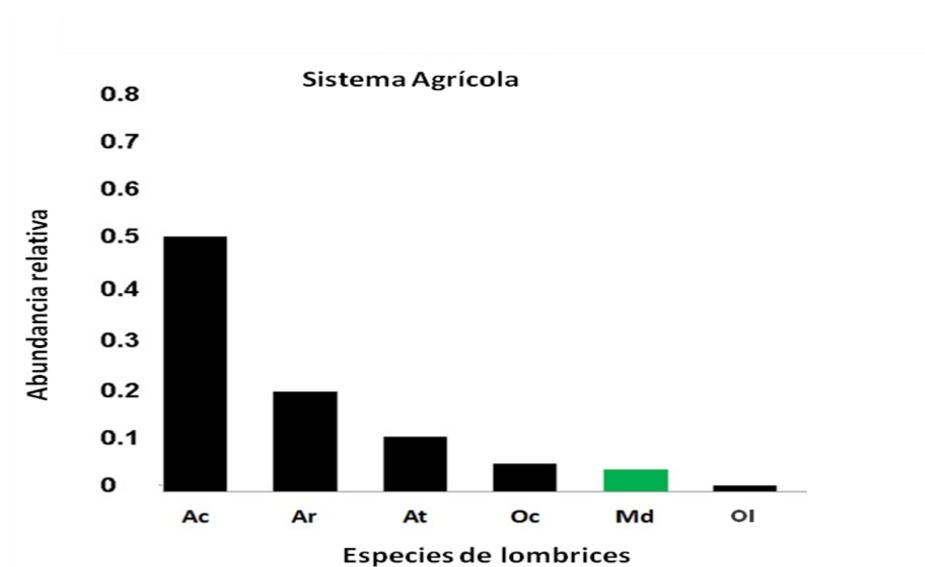


Fig. 4.24: Abundancia relativa de las especies de lombrices en el Sistema Agrícola. *Aporrectodea caliginosa* (Ac) *Aporrectodea rosea* (Ar), *Aporrectodea trapezoide* (At), *Octalasion cyaneum* (Oc), *Microscolex dubius* (Md), *Octalasion lacteum* (Ol). Color verde indica especie nativa y color negro indica especie exótica.

Comparación de las abundancias de las especies de lombrices entre los sistemas

Aporrectodea caliginosa

Esta especie presentó mayores abundancias en el Sistema Agrícola siendo significativas sus diferencias con los otros dos sistemas (Fig. 4.25).

Aporrectodea rosea

Sus abundancias no presentaron diferencias significativas entre los ambientes.

Aporrectodea trapezoide

Se encontró en los sistemas Pastizal Naturalizado y Agrícola, presentando diferencias en sus abundancias al 10 %. En el Sistema Mixto, de disturbio intermedio, no fue hallada esta especie.

Octalasion cyaneum

Sus abundancias no presentaron diferencias significativas entre los ambientes.

Octalasion lacteum

Sus abundancias no presentaron diferencias significativas entre los ambientes.

Microscoles phosphoreus

Se encontró en el Pastizal Naturalizado y en el sistema Mixto, pero no presentó diferencias significativas.

Microscolex dubius

Esta especie presentó diferencias entre los sistemas antropizados y el Pastizal Naturalizado, siendo sus abundancias mayores en estos últimos (Fig. 4.26).

Eukerria stagnalis

Solo se encontró en el Sistema mixto, no hallándose ningún ejemplar en los otros dos sistemas.

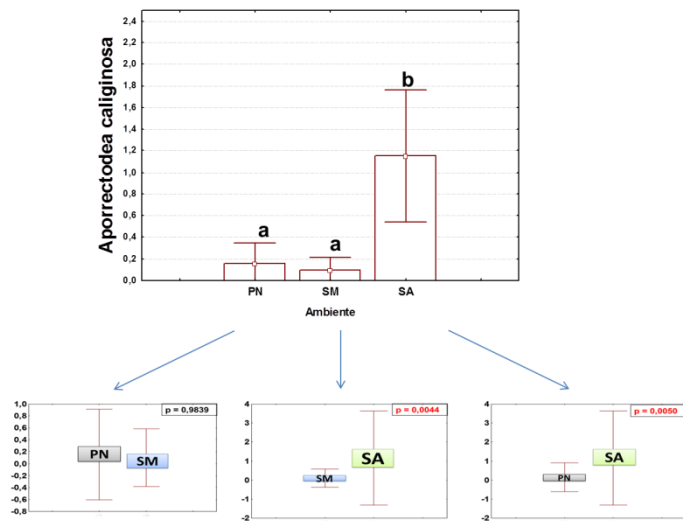


Fig. 4.25: Comparación de las abundancias de *Aporrectodea caliginosa*. PN: Pastizal naturalizado, SM: sistema mixto, SA: sistema agrícola. Letras distintas entre usos de suelo indican diferencias significativas (Kruskall-Wallis ANOVA, $p < 0,05$).

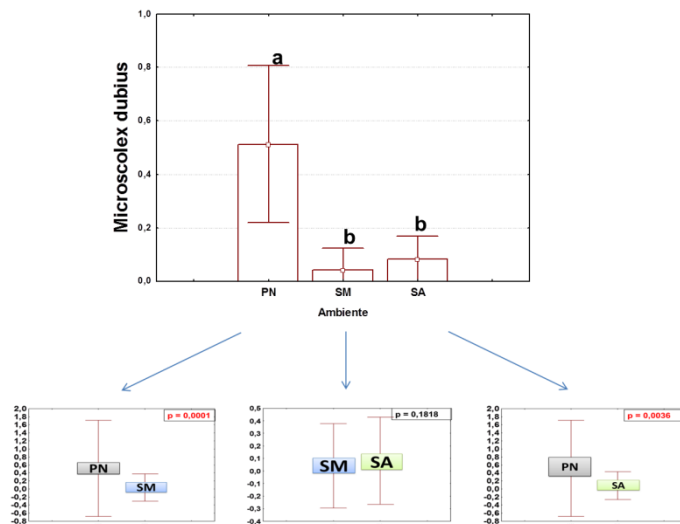


Fig. 4.26: Comparación de las abundancias de *Microscolex dubius*. PN: Pastizal naturalizado, SM: sistema mixto, SA: sistema agrícola. Letras distintas entre usos de suelo indican diferencias significativas (Kruskall-Wallis ANOVA, $p < 0,05$).

Tabla 4.12: Valores de Riqueza, Diversidad de Shannon y Equitatividad de especies de lombrices en los tres sistemas estudiados. PN: Pastizal Naturalizado; SM: Sistema Mixto; SA: Sistema Agrícola.

	PN	SM	SA
Riqueza (S)	7	7	6
Diversidad Shannon (H')	1,0520629	0,8376870	1,0681063
Equitatividad (J = H' / ln R)	0,5406534	0,5204842	0,6636518

En este grupo no hay diferencias de riqueza entre los sistemas, mientras que las diversidades fueron mayores en el PN y el SA (Tabla 4.12).

Discusión

- Los tres sistemas presentaron el mismo valor de riqueza pero las abundancias fueron más altas en el SA con la intensidad de uso más alta.
- La diversidad H' fue mayor en PN y SA y menor en SM.
- Las especies comunes en los tres sistemas fueron *Microscolex dubius*, *Aporrectodea caliginosa*, *A. rosea*, *Octolasion cyaneum* y *O. lacteum* difiriendo en sus abundancias.
- En el PN la especie dominante fue *M. dubius* (representando el 37% de todos los individuos colectados de esta especie).
- En el SM la especie *Eukerria stagnalis* fue la dominante, representando el 67% de todos los individuos colectados, mientras que *A. rosea* represento el 23%.
- En el SA, las especies más comunes fueron *A. caliginosa*, *A. rosea*, y *A. trapezoides*. Las especies exóticas representaron el 95 % de los individuos, siendo *M. dubius* la única nativa presente en este sistema.

Los resultados presentados muestran que, en el mismo suelo y el mismo régimen de temperatura y precipitación, la estructura de la comunidad de las

lombrices de tierra varió entre los diferentes sistemas estudiados. Estas variaciones pueden ser asociadas a la diferente intensidad del uso del suelo.

En el SA, la comunidad de lombrices fue afectada directamente por cambios causados por las prácticas de labranza, o indirectamente a través de cambios en el suministro de alimento. Varios estudios indican que la comunidad de lombrices es más abundante y rica en suelos no disturbados cuando se los compara con suelos agrícolas (Emmerling, C., 2001; Curry et al., 2008; Decaëns et al., 2008; Feijoo et al., 2011; Felten y Emmerling, 2011). En esta tesis sin embargo, estos patrones no fueron observados. Los tres sistemas presentaron el mismo valor de riqueza y las abundancias fueron mayores en el SA el cual presenta una mayor intensidad de uso. Estos resultados coinciden con los de Lee (1985), Paoletti (1999), y Smith et al. (2008), quienes encontraron que los cultivos anuales tienen mayores abundancias. La dominancia de especies introducidas sobre las nativas, es otra característica de sitios más disturbados, como lo muestran Fragoso et al. (1999), Winsome (2006), Chan y Barchia (2007).

La riqueza, composición y abundancia de lombrices, reflejan los cambios físicos, químicos y biológicos, provocados como resultado de las diferentes intensidades de uso de las prácticas agrícolas de cada sistema. La mayor abundancia de la especie nativa *M. dubius* fue asociada con una menor actividad antrópica. Como resultado, una fuerte reducción de la abundancia de su población puede ser interpretada como indicativa de un sistema de alto disturbio. Por el otro lado, *A. caliginosa* aumentó su abundancia con un incremento en el disturbio. Su presencia está claramente asociada con ambientes con altos disturbios como fue demostrado por varios autores como por ejemplo Johnston et al. (2014); Lüscher et al., (2014).

Un incremento en la intensidad de uso del suelo lleva a cambios en las propiedades físicas y químicas comparados con el suelo de menor impacto antrópico. La comunidad de lombrices es afectada por dos principales mecanismos: primeramente, por la perturbación mecánica y agroquímica introducida por las prácticas agrícolas intensivas. En segundo lugar, por el efecto que los cambios en las

variables químicas tienen en la comunidad de lombrices. Por otro lado, como ingenieros del ecosistema, las lombrices afectan las variables edáficas, como por ejemplo, la actividad microbiana. Por lo tanto, la asociación entre presencia y abundancia de las diferentes especies de lombrices puede ser usada como un indicador biológico de las condiciones físicas y químicas del suelo que habitan. Estos resultados muestran que la estructura de la comunidad de lombrices puede ser usada para monitorear diferencias en la intensidad del uso del suelo.

BLOGRAFÍA

- Abril, A., 2003. ¿Son los microorganismos edáficos buenos indicadores de impacto productivo en los ecosistemas? *Ecología Austral*, 13: 195-204.
- Aira, M., Domínguez, J., 2009. Microbial and nutrient stabilization of two animal manures after the transit through the gut of the earthworm *Eisenia fetida* (Savigny, 1826). *Journal of Hazardous Materials*, 161: 1234-1238.
- Altieri, M.A., 1993. El rol ecológico de la biodiversidad en Agroecosistemas. *Agroecología y Desarrollo* (4): 2-11.
- Álvarez, R., Steinbach, H., Bono, A., 2011. An artificial neural network approach for predicting soil carbon budget agroecosystems. *Soil Science Society American Journal*, 75(3): 965-975.
- Andrés, P. 1990. Descomposición de la materia orgánica en dos ecosistemas forestales del macizo del Montseny (Barcelona): papel de los ácaros oribátidos (Acarina, Oribatei). Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona. 237 p.
- Aoki, J.I., 1979. Difference in sensitivities of oribatid families to environmental change by human impacts. *Reveu DÉcologie et de Biologie du Sol*, 16: 415-422.
- Balesdent, J., Chenu, C., Balabane, M., 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil Tillage Res.*, 53: 215-230.
- Barbercheck, M., Neher, D., Anas, O., El-Allaf, S., Weicht, T., 2009. Response of soil invertebrates to disturbance across three resource regions in North Carolina. In: *Environ Monit Assess*. Vol. 152, p. 283–298.
- Barrios, E., Herrera, R., Valles, J.L., 1994. Tropical floodplain agroforestry systems in mid-Orinoco River basin, Venezuela. *Agroforestry Systems* 28: 143-157.
- Barrios, E., Bekunda, M., Delve, R.J., Esilaba, A., Mowo, J., 2001. Identifying and Classifying Local Indicators of Soil Quality East African Edition. Cali, Colombia: CIAT, 163p.
- Bedano, J.C., Cantú, M., Doucet, M., 2006. Influence of three different land management practices on soil mite (Arachnida: Acari) densities in relation to a natural soil. In: *Applied Soil Ecology*, 32: 293–304.
- Behan-Pelletier, V., 1999. Oribatid mite biodiversity in agroecosystems: role for bioindication. *Agric. Ecosyst. Environ.* 74: 411–423.
- Bengtsson, G., Gunnarsson, T., Rundgren, S., 1985. Influence of metals on

reproduction, mortality and population growth in *Onychiurus armatus* (Collembola). *Journal of Applied Ecology* 22: 967-978.

Berch M.B., Battigelli J.P. & Hope G.D. 2007. Responses of soil mesofauna communities and oribatid mite species to site preparation treatments in high-elevation cutblocks in southern British Columbia. *Pedobiologia* 51 (1): 23–32. DOI: 10.1016/j.pedobi.2006.12.001.

Berlese, A., 1905. Apparatchio per raccogliere presto ed in gran numero piccoli Artropodi. *Redia* 2: 85-9.

Bilde, J., Toft, S., 2000. The value of collembolan from agricultural soils as food for a generalist predator. *Journal of Applied Ecology*, 37: 672-683.

Botta, G.F., Jorajuria, D., Balbuena, R., Rosatto, H., 2004. Mechanical and cropping behaviour of direct drilled soil under different traffic intensities: effect of soybean (*Glycine max* L.) yields. *Soil Till. Res.*86(1) 9-14.

Bouche, M.B., 1977. Stratégies lombriciennes. In: Lohm, U., Persson, T. (Eds.), *Soil Organisms as Components of Ecosystems*. Biol. Bull., Stockholm, vol. 25: 122–132.

Breure, A.M., 2004. Soil Biodiversity: Measurements, Indicators, Threats and Soil Functions. *International Conference on Soil and Compost Eco-Biology*, León, 15-17, 83-96.

Brussaard, L., de Ruiter, P.C., Brown, G.G., 2007. Soil biodiversity for agricultural sustainability. *Agriculture Ecosystems and Environment*. 121: 233-244.

Cancela da Fonseca, J.P., Sarkar, S., 1996. On the evaluation of spatial diversity of soil microarthropod communities. *Eur. J. Soil Biol.* 32 (3): 131 – 140.

Cancela da Fonseca, J.P., Sarkar, S., 1998. Soil microarthropods in two different Managed ecological systems (Tripura, India). *Applied Soil Ecology* 9: 105–107

Chan, K.Y., Barchia, I., 2007. Soil compaction controls the abundance, biomass and distribution of earthworms in a single dairy farm in south-eastern Australia. *Soil & Tillage Research* 94: 75–82.

Chocobar Guerra, E.A., 2010. Edafofauna como indicador de calidad en un suelo cumulic phazem sometido a diferentes sistemas de manejo en un experimento de larga duración. Tesis de maestría.

Cortet, J., Ronce, D., Poinso-Balaguer, N., Beaufreton, C., Chabert, A., Viaux, P., Cancela da Fonseca, J.P., 2002. Impacts of different agricultural practices on the

- biodiversity of microarthropod communities in arable crop systems. *European Journal of Soil Biology*, 38: 239-244.
- Culik M. P., Filho, D. Z., 2003. Diversity and Distribution of Collembola (Arthropoda: Hexapoda) of Brazil. *Bio-diversity and Conservation*, Vol. 12, N° 6, pp. 1119-1143.
- Curry, J.P., Doherty, P., Purvis, G., Schmidt, O., 2008. Relationships between earthworm populations and management intensity in cattle-grazed pastures in Ireland. *Appl. Soil Ecol.* 39, 58–64.
- Decaëns, T., Margerie, P., Aubert, M., Hedde, M., Bureau F., 2008. Assembly rules within earthworm communities in North-Western France: regional analysis. *Appl. Soil Ecol.* 39, 321 –335.
- Delamare - Deboutteville C., 1951. Microfaune du sol des pays tempérés et tropicaux. *Vie et Milieu*, Suppl., I: 360.
- Di Ciocco, C.A., Sandler, R.V., Falco, L.B., Coviella, C.E., 2014. Actividad microbiológica de un suelo sometido a distintos usos y su relación con variables físico-químicas. *Rev. FCA UNCUYO*. 2014. 46(1): 73-85. ISSN impreso 0370-4661. ISSN (en línea) 1853-8665.
- Dunger, W., 1986. Observations on the ecological behaviour of some species of the *Tullbergia krausbaueri*- group. p. 111-115. En: Dallai, R. (ed.). 2nd International Seminar on Apterygota. Siena.
- Dunger, W., Sculz, H., Zimdars, B., Hohberg, K., 2004. Changes in collembolan species composition in Eastern German mine sites over fifty years of primary succession. *Pedobiología*, 48: 503-517.
- Edwards, C.A., Lofty, J.R., 1969. The influence of agricultural practice on soil microarthropod populations, in: J.G. Sheals (Ed.), *The Soil Ecosystem*, Systematics Association Publication No 8, London, pp. 237–247.
- Elliott, E.T., Hunt, H.W., Walter, D.E., 1988. Detrital foodweb interactions in North American grassland ecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 24: 41-56.
- Emmerling C., 2001. Response of earthworm communities to different types of soil tillage. *Appl. Soil Ecol.* 17, 91–96.
- Feijoo, A., Carvajal, A.F., Zúñiga, M.C., Quintero, H., Fragoso, C., 2011. Diversity and abundance of Earthworms in land use systems in central-western Colombia. *Pedobiología*, 54: 69–75.

- Felten, D., Emmerling, C., 2011. Effects of bioenergy crop cultivation on earthworm communities – A comparative study of perennial (*Miscanthus*) and annual crops with consideration of graded land –use intensity. *Appl Soil Ecol* 49, 167- 177.
- Filip, Z.K., 2002. International approach to assessing soil quality by ecologically-related biological parameters. *Agronomy Ecosystem Environmental*. 88: 169-174.
- Folke, C., Carpenter, S., Walker, B., Scheffer, M., Elmqvist, T., Gunderson, L., Holling, C.S., 2004. Regime shifts, resilience and biodiversity in ecosystem management. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 35: 557-581.
- Fragoso, C., Lavelle, P., Blanchart, E., Senapati, B., Jimenez, J., Martínez, M. de los A., Decaëns, T., Tondoh, J., 1999. Earthworm communities of tropical agroecosystems: origin, structure and influences of management practices. in: Lavelle, P., Brussaard, L., Hendrix, P.(Eds.). *Earthworm Management in Tropical Agroecosystems*. CAB International, Wallingford, UK, pp. 27–55.
- Frampton, G. K., 1994. Sampling to detect effects of pesticides on epigeal Collembola (springtails). *Aspects in Applied Biology* 37: 121-130.
- Frampton, G. K., 1997. The potential of Collembola as indicators of pesticide usage: evidence and methods from de UK arable ecosystem. *Pedobiologia* 41 (1-3): 179-184.
- Frioni, L., 1999. *Procesos microbianos*. Ed. de la Fundación Universidad Nacional de Río Cuarto. Argentina. 322 pp.
- Gergócs, V., Hufnagel, L., 2009. Application of Oribatid Mites as indicators (Review) – *Applied Ecology and Environmental Research* 7(1): 79-98.
- Giller, K.E., Beare, M.H., Lavelle, P., Izac, A.M.N., Swift, M.J., 1997. Agricultural intensification, soilbiodiversity and agroecosistema function. *Applied Soil Ecology*. 6: 3-16.
- Giller, K.E., Bignell, D., Lavelle, P., Swift, M.J., Barrios, E., Moreira, F., van Noordwijk, M., Barois, I., Karanja, N., Huising, J., 2005. Soil biodiversity in rapidly changing tropical landscapes: scaling down and scaling up. In: Bardgett, R., Usher, M.B., Hopkins, D.W. (Eds.), *Biological Diversity and Function in Soils*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 295–318.
- Gómez, M., Kruger, H., Sagardoy, M., 1996. Actividad biológica de un suelo de la zona semiárida bonaerense cultivado con la secuencia soja-trigo bajo tres prácticas culturales. *Ciencia del Suelo*. 14: 37-41.
- González, V., Díaz, M., Prieto, D., 2003. Influencia de la cobertura vegetal sobre las

- comunidades de la mesofauna edáfica en parcelas experimentales de caña de azúcar. *Revista Biología* 17(1): 18-25.
- Gormsen, D., Hedlund, K., Huifu, W., 2006. Diversity of soil mite communities when managing plant communities on set-aside arable land. In: *Applied Soil Ecology*. Vol. 31, p.147–158.
- Greenslade, P., 1997. Are Collembola useful as indicators of the conservation value of native grasslands? *Pedobiologia* 41 (1-3): 215-220.
- Guillen, C., Soto-Adames, F., Springer, M., 2006. Variables físicas, químicas y biológicas del suelo sobre las poblaciones de colémbolos en Costa Rica. En: *Agronomía Costarricense*. 2006, vol. 30, no. 2, p.19-29.
- Hågvar, S., 1984. Six common mite species (Acari) in Norwegian coniferous forest soils: Relations to vegetation types and soil characteristics. *Pedobiologia*, 27: 355-364.
- Hardy, R. W. F., Holstein, R. D., 1977. Methods for measurement of dinitrogen fixation, in: R.W.F. Hardy, A.H. Gibson (Eds), *A Treatise of Dinitrogen Fixation*. Section IV: *Agronomy and Ecology*, JohnWiley and sons, Inc., p 451-490.
- Hendrix, P.F., Crossley Jr. D.A., Blair, J.M., Coleman, D.C., 1990. Soil biota as components of sustainable agroecosystems. In: *Sustainable agricultural systems*, C.A. Edwards, R. Lal, P. Madden, R.H. Miler and G. House (Eds.). SWCS, Ankeny, USA. pp. 637-654.
- Hermosilla, W., 1978. Evolución mesofaunística de una sucesión ecológica secundaria antrópica. *Brenesia*, 14-15: 267 – 277.
- Hopkin, S.P., 1997. *Biology of springtails (Insecta: Collembola)*. Oxford University Press, Oxford. 333 p.
- Hunt, G.S., 1994. *Solenozetes gallonae* sp. nov., first record of the Plasmobatidae in Australia (Acari:Oribatida). *Memoirs Queensland Museum* 35 (1):129–134.
- Hutson, B.R., Veitch, L.G., 1983. Mean annual population density of Collembola and Acari on the soil and litter of three indigenous South Australian forest. *Aust. J. Ecol.*, 8: 113-126.
- Iturrondobeitia, J., Caballero, A., Arroyo, J., 2004. Avances en la utilización de los Ácaros Oribátidos como indicadores de las condiciones edáficas. En: S.C. Arandazi. Z.E. Donostia/San Sebastian (eds). *Munibe*. Nº 21: 70-91.
- Johnston, A.S.A., Hodson, M.E., Thorbek, P., Alvarez, T., Sibly, R.M., 2014. An energy

budget agent-based model of earthworm populations and its application to study the effect of pesticides. *Ecological Modelling*, 280: 5–17.

Kaneda, S., Kaneko, N., 2008. Collembolan feeding on soil affect carbon and nitrogen mineralization by their influence on microbial and nematode activities. *Biology and Fertility of Soils*, 44: 435 – 442.

Karyanto, A., Rahmadi, C., Franklin, E., Susilo, F., Wellington de Morais, J., 2011. Collembola, acari y otra mesofauna del suelo: el método Berlese. pp. 149-162. En: Fatima, M. S., Moreira, E., Huising J. & Bignell, D. E. (eds.). *Manual de biología de suelos tropicales. Muestreo y caracterización de la biodiversidad bajo el suelo*. México: Instituto Nacional de Ecología, 350 p.

Kracht, M., Schrader, S., 1997. Collembola and Acari in compacted soil of agricultural land under different soil tillage systems, *Braunsch. Naturkundl. Schr.* 5: 425–440.

Krantz & Walter, 2009. *A manual of acarology*. Third edition.

Kováč, L., Miklisová, D., 1997. Collembola communities (Hexapoda, Collembola) in arable soils of East Slovakia. *Pedobiologia* 41 (1-3): 62-68.

Ladell, W.R.S. 1936. A new apparatus for separating insects and other arthropods from the soil. *Ann. Appl. Biol.* 23: 862-79.

Lakly Michelle, B., Crossley, D.A. Jr., 2000. Tullgren extraction of soil mites (Acarina): Effect of refrigeration time on extraction efficiency. *Exp. Appl. Acarol.* 24: 135–140.

Lavelle, P., 1997. Faunal activities and soil processes: adaptive strategies that determine Ecosystem function. *Adv. Ecol. Res.*, 27: 93–132.

Lavelle, P., Brussaard, L., Hendrix, P., 1999. In: *Earthworm Management in Tropical Agroecosystems*, CABI Publishing, Oxon.

Lavelle, P., DecaËns, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F., Margerie, P., Mora, P., Rossi, J.P., 2006. Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology*, 42: 3-15.

Lee, K.E., 1985. *Earthworms. Their ecology and relationships with soils and land use*. Academic Press, Sydney.

Liebig, M. A., Varvel, G. E., Doran, J. W., Wienhold, B. J., 2002. Crop Sequence and Nitrogen Fertilization. Effects on Soil Properties in the Western Corn Belt. *Soil Science Society American Journal*. 66: 596-601.

- Lindberg, N., Bengtsson, J., 2006. Recovery of forest soil fauna diversity and composition after repeated summer droughts. *Oikos*, 114(3): 494 – 506.
- López-Hernández, D., Santaella, S., Chacón, P., 2006. Contribution of nitrogen-fixing organisms to the N budget in *Trachypogon savannas*. *European Journal of Soil Biology*. 42: 43-50.
- Lüscher, G., Jeanneret, P., Schneider, M.K., Turnbull, L.A., Arndorfer, M., Balázs, K., Báldi, A., Bailey, D., Bernhardt, K.G., Choisís, J.P., Elek, Z., Frank, T., Friedel, J.K., Kainz, M., Kovács-Hostyánszki, A., Oschatz, M.L., Paoletti, M.G., Papaja-Hülsbergen, S., Sarthou, J.P., Siebrecht, N., Wolfrum, S., Herzog, F., 2014. Responses of plants, earthworms, spiders and bees to geographic location, agricultural management and surrounding landscape in European arable fields. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 186: 124–134.
- Margalef, R., 1992. *Planeta azul, planeta verde*. Barcelona. Prensa científica.
- Martínez-Salgado, M.M., Gutiérrez-Romero, V., Janssens, M., Ortega-Blu, R., 2010. Biological soil quality indicators: A review. In: *Current Research, Technology and Microbiology and Microbial Biotechnology*, MendezVilas A (Editor.), Formatex.
- Mendoza, S., Villalobos, F., Ruiz, L., Castro, A., 1999.- Patrones ecológicos de los Colémbolos en el cultivo de maíz en Balun Canal, Chiapas, México. *Acta Zool. Mex.*, 78: 83-101.
- Mikanová, O., Javůrek, M., Šimon, T., Friedlová, M., Vach, M., 2009. The effect of tillage systems on some microbial characteristics. *Soil and Tillage Research*. 105(1): 72-76.
- Mischis, C.C., 2000. Las lombrices de tierra (Annelida, Oligochaeta) de la República Argentina. *Natura Neotropicalis*, 31(1-2): 17-27.
- Mischis, C.C., Moreno, A.G., 2003. A preliminary survey of the oligochaete fauna of Tierra del Fuego, Argentina. *Megadrilogica* 9 N° 8: 49-51.
- Momo, F., Falco, L., 2003. Mesofauna del suelo. Biología y ecología. En: *Microbiología agrícola. Un aporte de la investigación argentina*. Santiago del estero: Editorial de la Universidad Nacional de Santiago del Estero. Pag. 51-58.
- Momo, F., Falco, L.B., Compiladores, 2009. *Biología y Ecología de la fauna del suelo*. Editado por la Universidad Nacional de General Sarmiento.
- Najt, J., 1973. Sobre algunos Arthropleona de la Isla de los Estados. I. (Insecta, Collembola). *Physis, Sec. C*, 32: 241 – 243.

- Nannipieri, P. 1994. The potential use of enzymes as indicators of productivity, sustainability and pollution. In: CE Pankhurst; BM Doube; VVSR Gupta & PR Grace (eds). *Soil Biota- Management in Sustainable Farming Systems*. CSIRO, East Melbourne Australia. p 238-244.
- Norton, R., 1994. Evolutionary aspects of oribatid mite life histories and consequences for the origin of the Astigmata. In: Houck, M.A. (Ed.), *Mites: Ecological and Evolutionary Analyses of Life-History Patterns*. Chapman & Hall, New York, pp. 99 – 135.
- Palacios-Vargas, J. G. 1985. *Los Microartrópodos del Popocatepetl. Aspectos ecológicos y biogeográficos de los Oribátidos (Acarida) y los colémbolos (Apterygota)*. Tesis doctoral. Fac. Ciencias UNAM. 114 p.
- Paoletti, M.G., 1999. The role of earthworms for assessment of sustainability and as bioindicators. *Agric. Ecosyst. Environ.* 74, 137–155.
- Parisi, V., Menta, C., Gardi, C., Jacomini, C., Mozzanica, E., 2005. Microarthropod communities as a tool to assess soil quality and biodiversity: a new approach in Italy. In: *Agriculture, Ecosystems and Environment*. Nº 105, p. 323–333.
- Peredo, S., Barrera, C., Parada, E., Vega, M., 2012. Taxocenotic and biocenotic analysis over time of edaphic mesofauna in organic vaccinium sp. plantations southern central Chile. In: *Agrociencia*. Vol. 46, no. 2, p. 163-173.
- Perrotti, E. B. R., Pidello, A., 1996. Actividad nitrogenasa y capacidad redox en un Argiudol. *Cienciadel Suelo*. 14: 83-85.
- Pidello, A., Perotti, E. B. R., Chapo, G. F., Menéndez, L. T., 1995. Materia orgánica, actividad microbiana y potencial redox en dos argiudoles típicos bajo labranza convencional y siembra directa. *Ciencia del Suelo*. 13: 6-10.
- Pik, A., Dangerfield, J., Bramble, R., Angus, C., Nipperess, D., 2002. The use of invertebrates to detect small-scale habitat heterogeneity and its application to restoration practices. In: *Environmental Monitoring and Assessment*. Vol. 75, p. 179–199.
- Pilatti, M.A., de Orellana, J.A., Priano, L.J., Felli, O.M., Grenon, D.A., 1988. Indicencia de manejos tradicionales y conservacionistas sobre propiedades físicas, químicas y biológicas de un argiudol en el sur de Santa Fe. *Ciencia del Suelo*, Vol 6, Nº 1.
- Pinto, C., Sousa, J. P., Graca, M.A.S., Gama Da, M.M., 1997. Forest Soil Collembola. Do tree introduction make a difference? *Pedobiologia* 41 (1-3): 131-138.
- Prat, B., Massoud, Z., 1980. Étude de la communauté des Collemboles dans un sol

- forestier. I. Structure du peuplement. *Revue d'Écologie et de Biologie du Sol* 17 (2): 199-216.
- Ramos, E., Zuñiga, D., 2008. Efecto de la humedad, temperatura y pH del suelo en la Actividad microbiana a nivel de laboratorio. *Ecología Aplicada*. 7(1-2): 123-130.
- Reeleder, R.D., Miller, J.J., Ball Coelho, B.R., Roy, R.C., 2006. Impacts of tillage, cover crop, and nitrogen on populations of earthworms, microarthropods, and soil fungi in a cultivated fragile soil. *Applied Soil Ecology* 33: 243–257.
- Reynolds, J., 1996. *Earthworms biology and Ecology*. ISBN 0-9690911-4-1.
- Righi, G., 1979. Introducción al estudio de las Lombrices del Suelo (Oligoquetos Megadrilos) de la Provincia de Santa Fe (Argentina). *Rev. Asoc. Ciencias Naturales del Litoral*, 10, 89-155.
- Rockett, C. L., 1986. Agricultural impact on the horizontal distribution of Oribatid mites (Acari: Oribatida). *Pedobiologia*, 12: 175-180, 1986.
- Roger-Estrade, J., Anger, C., Bertrand, M., Richard, G., 2010. Tillage and soil ecology: partners for sustainable agriculture. *Soil Tillage Res* 111: 33–40. doi:10.1016/j.still.2010.08.010
- Sainz Rozas, H. R., Echeverría, H. E., Angelini, H. P., 2011. Niveles de carbono orgánico y pH en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extrapampeana argentina. *Ciencia del Suelo*. 29(1): 29-37.
- Salt, G., Hollick, F.S.J., 1944. Studies of wireworm populations. I. A census of wireworms in pasture. *Ann. Appl. Biol.* 31: 52-64.
- Sandler R.V., Falco L.B., Di Ciocco C., de Luca R., Coviella C.E., 2010. Eficiencia del embudo Berlese-Tullgren para extracción de microartrópodos en suelos argiudoles típicos de la provincia de buenos aires. *Ci. Suelo* 28 (1): 1-7.
- Scampini, E., Osterrieth, M.L., Martinez, P., 2000. Relación entre propiedades físico-químicas y mesofauna asociada de una bordura en Argiudoles de la Llanura Pampeana. *Neotropica* 44(111-112): 3-12.
- Smeding, F.W., de Snoo, G.R., 2003. A concept of food-web structure in organic arable farming systems. *Landscape and Urban Planning* 65: 219-236.
- Smith, R., McSwiney, C., Grandy, A., Suwanwaree, P., Snider, R., Robertson, G., 2008.

- Diversity and abundance of earthworms across an agricultural land-use intensity gradient. *Soil & Tillage Research*. 100, 83–88.
- Socarras, A.A., Robaina, N., 2011. Mesofauna edáfica en diferentes usos de la tierra en la Llanura Roja de Mayabeque y Artemisa, Cuba. *Pastos y Forrajes*, Vol. 34, N° 3: 347 - 358.
- Socarras, A.A., 2013. Mesofauna edáfica: indicador biológico de la calidad del suelo. *Pastos y Forrajes*, Vol. 36, N° 1: 5 – 13.
- Stork, N.E., Eggleton, P., 1992. Invertebrates as determinants and indicators of soil quality. *American Journal of Alternative Agriculture* 7: 38-47.
- Strickland, A.H., 1945. A survey of the arthropod soil and litter fauna of some forest reserves and cacao estates in Trinidad, British West Indies. *J. Anim. Ecol.* 14: 1-11.
- Swift, M.J., Heal, O.W., Anderson, J.M., 1979. *Desomposition in terrestrial ecosystems*. Blackwell Scientific Publications, London, UK.
- Thrupp, L.A., 2000. Linking agricultural biodiversity and food security: the valuable role of agrobiodiversity for sustainable agriculture. *Int Aff.* 76: 283-297.
- Tsiafouli, M.A., Kallimanis, A.S., Katana, E., Stamou, G.P., Sgardelis, S.P., 2005. Responses of soil microarthropods to experimental short-term manipulations of soil moisture.- *Applied Soil Ecology*, 29: 17-26.
- Tullgren, A., 1918. Ein sehr einfacher Ausleseapparat fuAr terricole Tierfaunen. *Z. angew. Ent.* 4: 149-50.
- Vegter, J.J., Joosse, E.N.G., Ernsting, G., 1988. Community structure, distribution and population dynamics of Entomobryidae (Collembola). *J. Anim. Ecol.*, 57: 971-981.
- Waikhom, M.D., Singh B., Joymati, D.L., 2006. Vertical distribution pattern of Collembola in a sub tropical forest floor of Manipur. *Zoos' Print Journal* 21 (7): 2331-2332.
- Wallwork, J.A., 1970. *Ecology of Soil Animals*. McGraw Hill, London.
- Winsome ,T., Epstein, L., Hendrix, P.F., Horwath, W.R., 2006. Competitive interactions between native and exotic earthworm species as influenced by habitat quality in a California grassland. *Agriculture, Ecosystems & Environment Applied Soil Ecology*, 32: 38–53.

Wurst, S., De Deyn, G. & Orwin, K., 2012. Soil Biodiversity and Functions. pp. 28- 44.
En: Diana H. Wall, Richard D. Bardgett, Valerie Behan-Pelletier, Jeffrey E. Herrick and T. Hefin Jones (eds.). Soil Ecology and Ecosystem Services. Oxford: Oxford University Press, 2012. 406 p.

www.tolweb.org/Acari

CAPÍTULO V
INDICADORES BIOLÓGICOS

Buscando indicadores

En la actualidad, los factores biológicos se han convertido en criterios importantes para valorar el estado del suelo (Vallejo-Quintero, V.E., 2013). Está ampliamente aceptado que la actividad de los organismos edáficos no sólo es un factor clave en la fertilidad del suelo, sino que también lo es en la estabilidad y en el funcionamiento tanto de los ecosistemas naturales como de los agroecosistemas (Trasar et al., 2000; Scheu, S., 2002).

Cabe recordar aquí la hipótesis planteada al inicio: “Sistemas con diferentes intensidades de uso de los suelos, presentan diferencias en la riqueza, diversidad y abundancia de sus comunidades de biota edáfica, cambios que a su vez afectarán y serán afectados por diferentes propiedades físicas y químicas de los suelo. Estas variaciones en la biota del suelo, representan una respuesta integrada que puede ser utilizada como indicadora de la calidad del suelo”. El objetivo principal de esta tesis fue: Evaluar y cuantificar efectos directos e indirectos de diferentes grados de intensidad de uso del suelo sobre la estructura de una parte de la comunidad biótica (abundancia, riqueza y diversidad) y parámetros físico – químicos del ecosistema edáfico, para el desarrollo de indicadores biológicos de detección temprana del deterioro de los suelos. Por todo esto, se analizó un conjunto de variables ambientales, dos variables microbiológicas y la comunidad de colémbolos, ácaros y lombrices de tres sistemas de uso de la tierra.

Con este objetivo en mente se realizaron los análisis de las comunidades detallados en el Capítulo IV, las cuales presentaron diferencias en su composición, riqueza, diversidad y abundancia, en función del sistema de uso evaluado. ¿Pero qué nos dicen estas diferencias y cómo se pueden explicar en el contexto en el cual estamos trabajando?

Interpretación de los resultados obtenidos

Como ya se ha podido observar en el análisis de los grupos estudiados en el Capítulo IV, algunos de los resultados obtenidos han diferido con respecto a parte de la bibliografía existente y por tal razón surge la pregunta de a qué se podría deber esta disimilitud. Y es así que llegado a este punto del estudio, se plantearon dos nuevas hipótesis que pudieran explicar la discrepancia: 1) Los organismos responden de manera diferente a las condiciones ambientales de los sitios y por esto los resultados difieran con respecto a la bibliografía consultada, o 2) Los sitios estudiados no representan un gradiente de disturbio tal y como lo planteamos en este trabajo, es decir, difieren ambientalmente de lo que se espera que sean un Pastizal Naturalizado, un sistema Mixto y un sistema Agrícola con más de 50 años de agricultura continua.

Para poner a prueba las dos hipótesis, primeramente se analizó cómo se relacionaban los grupos encontrados con las variables físico – químicas del suelo, realizando un análisis de superficies de respuesta.

La metodología de superficies de respuesta es un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas utilizadas para analizar problemas en los que una variable de interés es influenciada por otra. El análisis implica realizar un PCA (Análisis de Componentes Principales) de las variables ambientales, y con Modelos Aditivos Generalizados (GAM) ajustar las abundancias de los grupos taxonómicos a las variables reducidas del PCA ambiental. A partir de este ajuste de las abundancias de cada grupo taxonómico por separado a los ejes del PCA, las superficies de respuesta se forman con la predicción de las abundancias a partir de los ejes del PCA.

El PCA es una técnica del análisis multivariado, que permite la reducción de datos, su objetivo central es construir combinaciones lineales (componentes principales) de las variables originales que contengan una buena parte de la variabilidad total original. El PCA transforma el conjunto de variables originales en un conjunto más pequeño de variables, las cuales son combinaciones lineales de las

primeras, que contienen la mayor parte de la variabilidad presente en el conjunto inicial (Díaz, L., 2002).

Este análisis busca:

- ✓ Generar nuevas variables que expresen la información contenida en un conjunto de datos.
- ✓ Reducir la dimensión del espacio donde están inscritos los datos.
- ✓ Eliminar las variables (si es posible) que aporten poco a la variabilidad de los datos y al estudio del problema.

A su vez, el Modelo Aditivo Generalizado (GAM), presentado por Hastie y Tibshirani en 1990, es una extensión de los modelos tradicionales de regresión lineal para el análisis de los datos, que incorpora la no linealidad y la regresión no paramétrica. El modelo está construido por la suma de funciones suaves (splines) de las variables predictoras, pudiendo ser éstas, variables continuas, variables categóricas, número de casos y series de datos. A diferencia de los modelos de regresión lineal, el modelo sustituye la suma de funciones lineales, por la suma de funciones no necesariamente lineales donde cada una de las funciones es estimada de manera muy flexible, pudiendo estas mostrar el efecto no lineal de esa relación. El método permite definir las funciones de manera muy general, es decir, este modelo cambia la sumatoria de los términos de las variables del modelo lineal por una suma de funciones de las distintas variables predictoras.

El análisis da como resultado gráficos en los cuales se muestran, por un lado un vector que indica la dirección principal del cambio en la abundancia del grupo taxonómico respecto de las variables consideradas en el PCA, el cual es un ajuste lineal pero que no indica toda la posible variación en la respuesta de las abundancias, y por otro lado muestra las superficies de respuesta que están representadas en los gráficos por isolíneas de abundancia y que representan el ajuste no lineal con el universo de las variables ambientales.

Resultado del análisis de superficies de respuesta

De todos los grupos biológicos analizados se realizó el análisis de superficies de respuesta con aquellas variables microbiológicas y grupos taxonómicos que son significativos al 0,05 con respecto al PCA de variables ambientales. Ellos son:

1) Variable microbiológica:

De las dos **variables microbiológicas** que se midieron, ARA dio significativa en su relación con las variables físico – químicas, y se evidencia su correlación positiva con la MO y HR y negativa con CE y Mg.

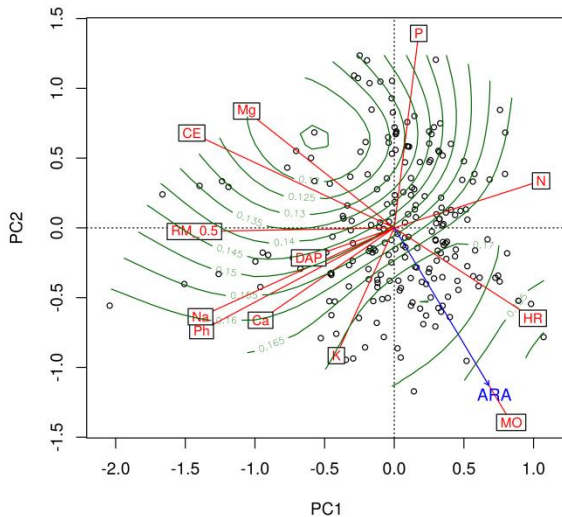


Fig. 5.1: Superficie de respuesta de la variable microbiológica ARA.

Se conoce que cuanto mayor es la cantidad de materia orgánica presente en el suelo, mayor es la actividad microbiológica, ya que esta comunidad necesita de la MO como fuente de alimento y energía para su crecimiento y multiplicación, además de jugar un importante rol en el proceso de descomposición (Fierer, N., 2009; Bowles et al, 2014). Nuestros resultados coinciden con esta respuesta y por lo tanto verifican que en este caso el comportamiento de esta variable microbiológica es el esperado.

En relación con las isolíneas de la superficie de respuesta, se ve una cierta no linealidad del comportamiento del ARA con respecto al conjunto de las variables ambientales.

2) Familias de Colémbolos

De las 5 familias de **colémbolos** encontradas, 4 resultaron significativas: Hypogastruridae, Isotomidae, Entomobrydae, Symphyleona.

El análisis de los gráficos (Fig. 5.2) nos muestra que estas familias se comportan todas en el mismo sentido y se relacionan positivamente con la Humedad y negativamente con la CE y con los valores de Mg.

Es sabido que la humedad es uno de los factores que mayor efecto tiene sobre las abundancias de los colémbolos, y por tal motivo esta respuesta es la esperada, ya que está ampliamente documentada su susceptibilidad a las variaciones en la HR, y que una disminución de ella, produce un descenso considerado en sus abundancias (Takeda, H., 1981; Holt, J.A., 1985; Hopkin, S.P., 1997; Eaton et al., 2004; Bedano et al., 2006).

El comportamiento de la comunidad de colémbolos es el esperado en relación a las variables ambientales, y al igual que con lo que sucede con el ARA, las isolíneas de las superficies de respuesta muestran la no linealidad de las familias de colémbolos con el conjunto de las variables ambientales, lo que demuestra que el comportamiento de estos organismos no se puede predecir tan claramente y su comportamiento responde de manera diferente al ambiente creado por la combinación de estas variables.

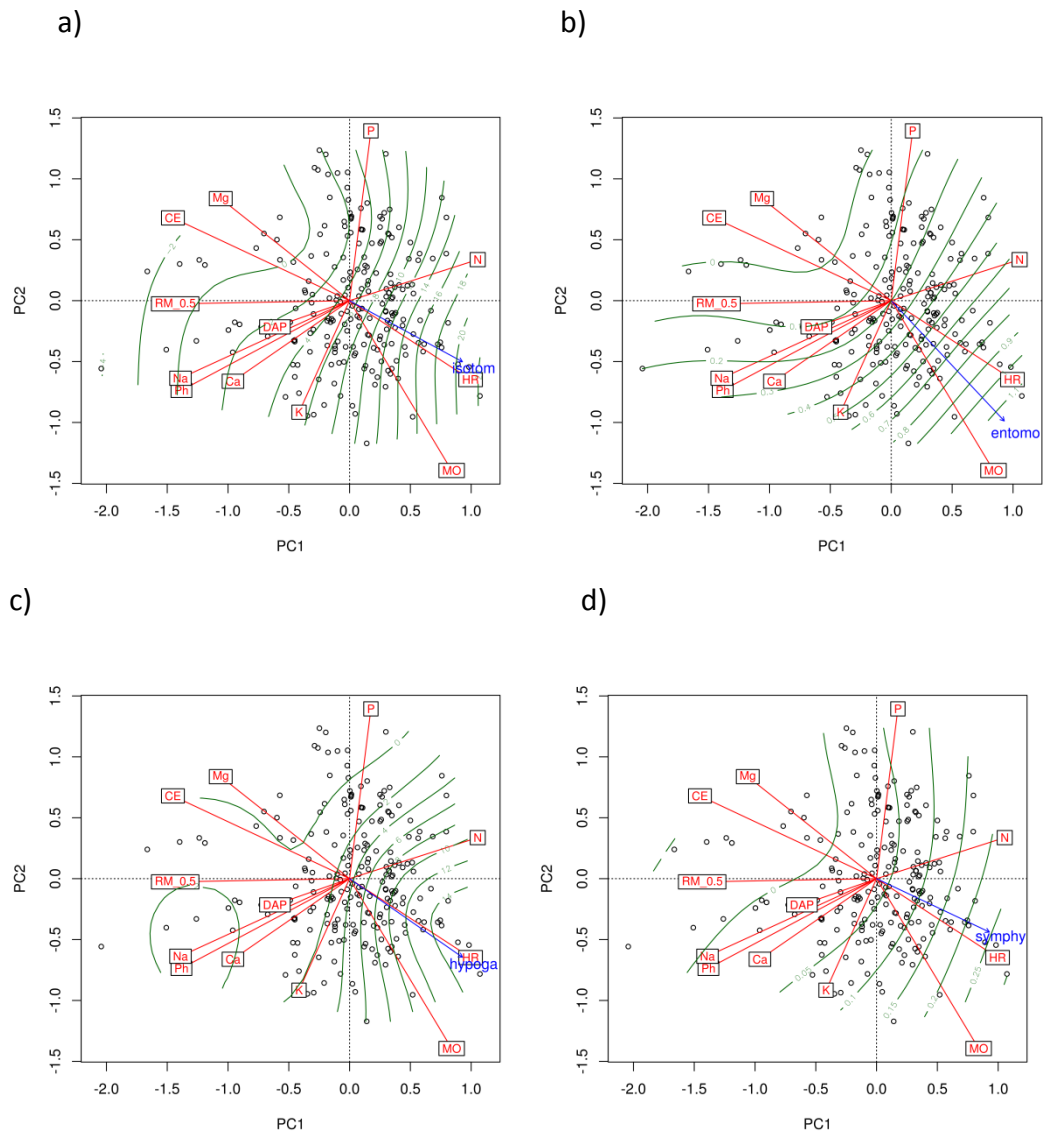


Fig. 5.2: Superficies de respuesta de las familias de colémbolos. a) Isotomidae; b) Entomobryidae; c) Hypogastruridae y d) Symphypleona.

3) Superfamilias de Ácaros:

La respuesta de los **ácaros** resultó más variada que la de los Colémbolos, y además de las 25 superfamilias encontradas, solo resultaron significativas 3 de ellas, Oripodoidea, Parasitoidea, Veigaidoidea. Las relaciones de ellas con las variables ambientales son:

Oripodoidea (Oribatida) se correlaciona positiva y principalmente con la MO y en menor medida con la HR.

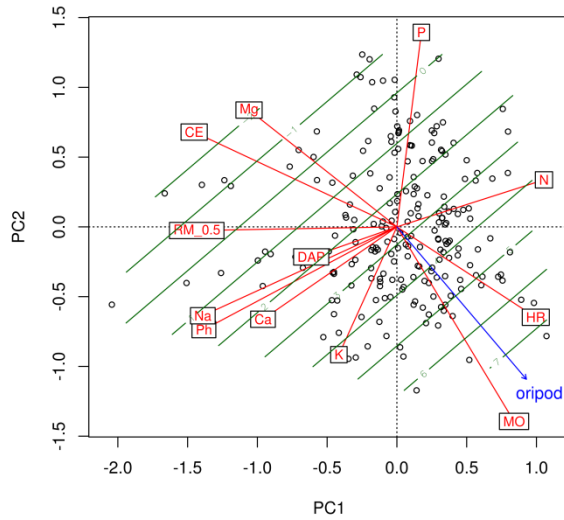


Fig. 5.3: Superficies de respuesta de la supefamilia de ácaros Oripodoidea.

Parasitoidea (Mesostigmata) se correlaciona positivamente con la HR y ligeramente con el N y negativamente con CE y Mg.

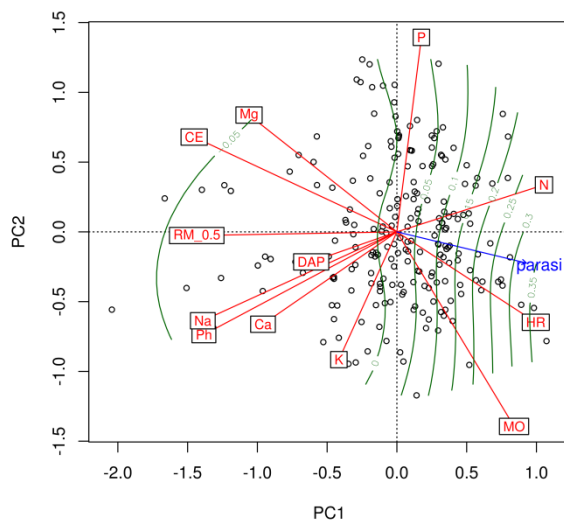


Fig. 5.4: Superficies de respuesta de la supefamilia de ácaros Parasitoidea.

Veigaidoidea (Mesostigmata), se relaciona positivamente con el K y negativamente con el P.

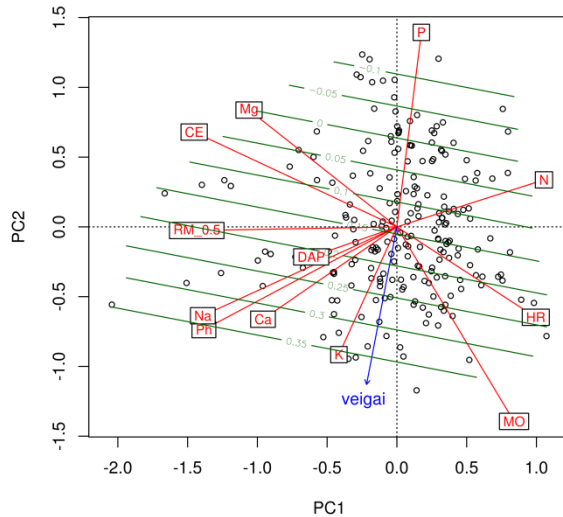


Fig. 5.5: Superficies de respuesta de la supefamilia de ácaros Veigaidoidea.

En el caso de los ácaros no contamos con suficiente bibliografía para saber si este es el comportamiento habitual de estas superfamilias con las variables físico – químicas mencionadas, por lo que estos resultados pueden ser de utilidad para futuras investigaciones. Lo que resulta novedoso son las superficies de respuesta de las superfamilias Oripodoidea y Veigaidoidea, las cuales presentan isoclinas prácticamente rectas lo que indica un comportamiento lineal con el universo creado por las variables ambientales.

4) Cuatro especies de Lombrices:

De las 8 especies de **lombrices** encontradas, 4 resultaron significativas *Aporrectodea caliginosa*, *Eukerria stagnalis*, *Octolasion cyaneum*, *Microscolex dubius*.

Aporrectodea caliginosa se correlaciona positiva y principalmente con la MO.

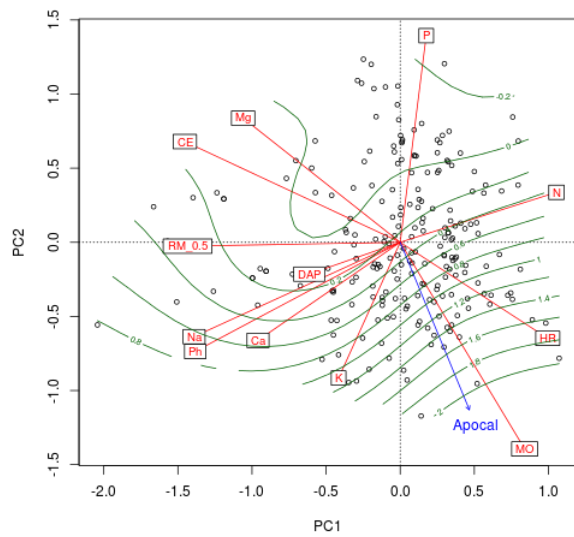


Fig. 5.6: Superficies de respuesta de la especie de la lombriz *Aporrectodea caliginosa*.

Esta especie, según la bibliografía, está asociada con ambientes muy disturbados, con niveles altos de K, bajos de CE y Na, y baja actividad microbiana, todos comportamientos típicos de sistemas con agricultura intensiva. Es la especie mejor adaptada a ambientes muy disturbados, esto implica que la población se recupera rápidamente después de un disturbio (Curry, J.P., 2004, Felten y Emmerling, 2011; Decaëns et al., 2011), como también se sabe que no es afectada significativamente por los cambios en la calidad de la hojarasca (Curry y Schmidt, 2007).

Por otro lado *Eukerria stagnalis* se relaciona positivamente con N y de manera negativa con RM, Dap, Na, pH y Ca.

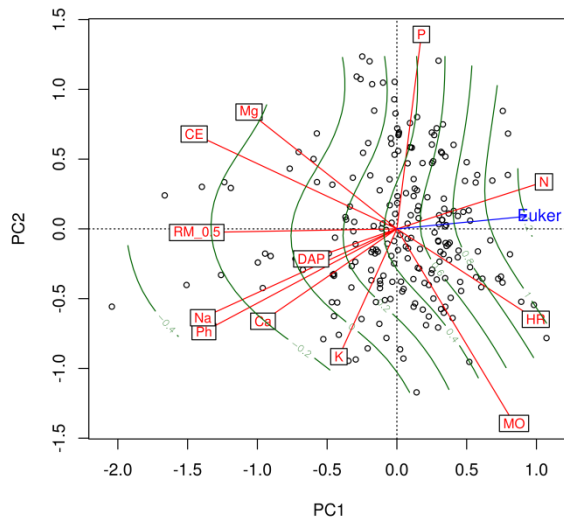


Fig. 5.7: Superficies de respuesta de la especie de la lombriz *Eukerria stagnalis*.

Eukerria stagnalis está primariamente asociada a condiciones de humedad alta, incremento en la acidez del suelo y una reducción en los niveles de Ca y K, las cuales son condiciones relevantes en un sistema de uso de intensidad intermedia. Las isolíneas de abundancias coinciden con estas relaciones entre esta especie y las variables ambientales.

Octalacion cyaneum y *Microscolex dubius* por su parte, se relacionan positivamente con el K y negativamente con el P.

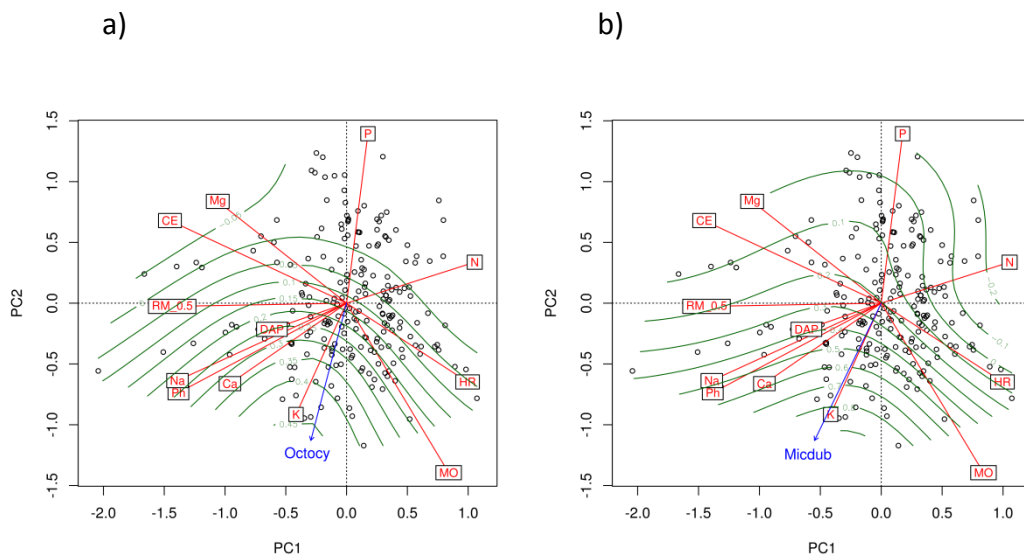


Fig. 5.8: Superficies de respuesta de las especies de las lombrices a) *Octalacion cyaneum* y b) *Microscolex dubius*.

Microscolex dubius está asociada con sitios que exhiben altos niveles de Ca, actividad microbiológica y alta resistencia mecánica, características que describen el sistema de pastizal naturalizado.

Es interesante notar que las especies de lombrices más relacionadas con las diferencias entre los sistemas, no están relacionadas con las variables más usualmente medidas: MO, N y P. Por lo tanto, monitorear estas especies puede proveer indicación indirecta de nutrientes como Mg, Ca y K, y completar la información provista por otros análisis de suelo más comunes en los agroecosistemas.

Al igual que en los colémbolos, las especies de lombrices analizadas en esta tesis muestran una respuesta no lineal con las variables físicas y químicas, lo que vuelve a mostrar que el comportamiento de estos organismos es difícilmente predecible viendo el conjunto de las variables físico - químicas y que ellas responden de manera diferente al ambiente creado por la combinación de estas variables.

Respondiendo a la primera de las hipótesis planteadas en esta etapa del trabajo de si los organismos estan respondiendo de manera diferente a las condiciones ambientales de los sitios, se ve que, si bien en algunos casos hay falta de bibliografía que lo avale, en forma general los organismos se comportaron de manera esperada, relacionándose de forma ya documentada con las variables físico – químicas, comportándose de manera no lineal con el universo creado por el conjunto de variables, por lo que se puede concluir que en su mayor parte, no son los grupos biológicos los que se están comportando de manera inesperada.

Entonces: ¿Qué es lo que está sucediendo con los ambientes seleccionados para el estudio?

Como se resalto anteriormente, el comportamiento de los organismos en relación a las variables ambientales analizadas, resultó ser concordante con la información pre-existente. Por lo tanto se procedió a evaluar la segunda hipótesis planteada en esta etapa del estudio: “Los sitios estudiados no representan un gradiente de disturbio tal y como lo planteamos en este trabajo, es decir, difieren ambientalmente de lo que se espera que sean un Pastizal Naturalizado, un sistema Mixto y un sistema Agrícola con más de 40 años de agricultura continua.” y así determinar por qué los organismos no respondieron en el sentido esperado al gradiente planteado. Para esto, se comparó, ambientalmente hablando, los suelos modales, los cuales presentan características edáficas representativas de suelos que no sufrieron intervención del hombre, con los sitios muestreados.

En la tabla 5.1 se muestra el estado del suelo esperado según el sistema de uso que se está aplicando según la bibliografía y lo encontrado en nuestro análisis.

Tabla 5.1: Comparación de las variables físico – químicas entre un suelo esperado y uno observado. En *itálica* se representan las diferencias entre los valores esperados y medidos.

Características		PN		SM		SA		
		Esperado	Observado	Esperado	Observado	Esperado	Observado	
Físicas	Dap	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	Medio	Medio	Alto	Alto	
	Hr	Alto	Alto	<i>Medio</i>	<i>Alto</i>	Alto	Alto	
	RM	0-5	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Alto</i>	<i>Bajo</i>	<i>Bajo</i>	<i>Medio</i>
		5-10	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	Bajo	Bajo	<i>Alto</i>	<i>Medio</i>
Químicas	CE	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	Medio	Medio	<i>Alto</i>	<i>Bajo</i>	
	pH	Alto	Alto	<i>Alto</i>	<i>Medio</i>	<i>Bajo</i>	<i>Medio</i>	
	MO	Alto	Alto	<i>Medio</i>	<i>Alto</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	
	N	Bien provisto	Bien provisto	<i>Provisto</i>	<i>Bien provisto</i>	<i>Deficiente</i>	<i>Bien provisto</i>	
	P	<i>Bien provisto</i>	<i>Deficiente</i>	Provisto	Provisto	<i>Deficiente</i>	<i>Provisto</i>	
	Ca	<i>Alto</i>	<i>Bajo</i>	<i>Medio</i>	<i>Bajo</i>	Bajo	Bajo	
	Mg	<i>Alto</i>	<i>Medio</i>	Medio	Medio	<i>Bajo</i>	<i>Medio</i>	
	Na	<i>Igual</i>	<i>Alto</i>	<i>Igual</i>	<i>Medio</i>	<i>Igual</i>	<i>Medio</i>	
K	Alto	Alto	<i>Medio</i>	<i>Alto</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>		

Observando los resultados, puede apreciarse que muchas de las variables analizadas difieren de los resultados esperados. Los campos agrícolas presentan características que nos indican que no presentan un alto grado de deterioro agronómico, ya que muchos de los valores de las variables son buenos a muy buenos, como por ejemplo los niveles de MO y nutrientes, que son niveles considerados óptimos para el buen desarrollo de los cultivos, así como también presenta valores buenos de RM, Ce y pH. A su vez el pastizal naturalizado posee características no esperadas para un suelo no antropizado como por ejemplo, los valores de Dap, RM y Ce.

Analizando esta comparación, vemos que los campos muestreados difieren de lo que se esperaba de ellos. Estos resultados, junto con lo observado al momento de algunos de los muestreos, donde se observó que varias de las prácticas agrícolas que se aplicaron en el SA son prácticas conservacionistas, ya que se comprobó que se dejaba una muy buena capa de rastrojos luego de la cosecha, lo que beneficia la regulación de la humedad y la temperatura, disminuye los efectos de la erosión y provee una muy buena cantidad de alimentos para toda la comunidad edáfica que se alimenta de la materia orgánica, puede ser una de las razones por las cuales las comunidades edáficas se comportaron de manera diferente en el gradiente de disturbio postulado al comienzo del estudio.

A su vez el pastizal naturalizado, presentó ciertas características que indican cierto grado de degradación o deterioro, y que posiblemente sean el motivo por el cual la comunidad de la edafofauna se vea afectada en su abundancia, diversidad y riqueza.

Algunos de los grupos encontrados ¿son indicadores de algunos de los sistemas?:

Cálculo de Indval

Todo el análisis previo nos muestra que los sistemas analizados presentan características físicas, químicas y biológicas diferentes a lo esperado al inicio de esta tesis. Si bien hay diferencias significativas de los valores de estas variables entre los

ambientes, esas diferencias no muestran un gradiente de intensidad de uso determinado. Estos resultados, de por sí novedosos, dificultan el cumplimiento del objetivo original de esta tesis, por el cual se planteó el diseño de un índice biológico de calidad del suelo, basado en un gradiente de intensidad de uso.

Por tal motivo se decidió realizar un análisis de grupos indicadores, ya que determinar la presencia o abundancia de un pequeño conjunto de grupos indicadores, como alternativa al muestreo de toda la comunidad, puede llegar a ser especialmente útil en el monitoreo ambiental a largo plazo para la conservación o manejo ecológico. Como criterio de selección, las especies son elegidas como indicadoras si: (i) reflejan el estado biótico o abiótico del ambiente; y (ii) muestran los impactos de los cambios ambientales; y (iii) predicen la diversidad de otras especies, taxas o comunidades dentro de un área (De Cáceres, M., 2013).

Para determinar si alguno de los grupos encontrados, más allá de presentar diferencias en sus abundancias entre los ambientes, son indicadores de alguno de estos sistemas, realizamos el análisis Indval (valor indicador) (Dufrene and Legendre, 1997).

Este análisis determina los grupos indicadores utilizando la relación entre la presencia de grupos taxonómicos o valores de su abundancia a partir de un conjunto de muestras y la clasificación de los sitios muestreados, que puede representar tipos de hábitat o estados de perturbación. Por lo tanto, hay dos elementos en un análisis de grupos indicadores: (1) la matriz de datos de la comunidad; y (2) el vector que describe la clasificación de los sitios muestreados.

Dufrene y Legendre (1997) definieron el valor Indicador (IndVal) para medir la asociación entre un grupo taxonómico y un sitio. El método calcula el Índice Indval entre los grupos taxonómicos y cada sitio y luego busca la relación que corresponde al valor más alto de asociación. Por último, la significancia estadística de esta relación se evalúa mediante una prueba de permutación.

El índice Indval combina las abundancias de los grupos taxonómicos y la frecuencia de ocurrencia de éstos en los diferentes sitios. Un alto valor indicador se obtiene por una combinación de una gran abundancia media dentro de un sistema de uso en comparación con otro sistema de uso (especificidad) y la presencia en la mayoría de los sitios, de un mismo sistema de uso, de ese grupo taxonómico (fidelidad).

El índice de valor del indicador es el producto de dos componentes, llamados 'A' y 'B'

1. Componente "A" es la probabilidad de que un sitio muestreado pertenezca a un sistema de uso determinado, dado el hecho de que el grupo taxonómico se ha encontrado. Esta probabilidad condicional se llama la especificidad o valor predictivo positivo del grupo taxonómico como indicador de sistema de uso determinado.
2. Componente "B" es la probabilidad de encontrar el grupo taxonómico en sitios pertenecientes al mismo sistema de uso. Esta segunda probabilidad condicional se llama la fidelidad o la sensibilidad de la especie como indicador de un sistema de uso determinado.

A y B pueden ser ambos buenos indicadores. Si A es alto y B es bajo (o viceversa) se tendría un indicador asimétrico.

Realizando el análisis con los 38 grupos taxonómicos estudiados, encontramos que:

Los grupos **indicadores de PN (bajo disturbio antrópico)** son: *Microsclex dubius* y *M. phosphoreus*.

Tabla 5.2: Valores de los componentes A y B del calculo de Inval del Pastizal Naturalizado.

	A	B	p-value
<i>Microscolex dubius</i>	0.80435	0.22222	0.001
<i>M. phosphoreus</i>	1.00000	0.05556	0.032

Ambas son especies de lombrices nativas, que por ser tales no resisten en gran medida a los disturbios ocasionados por los manejos agrícolas, pero que persisten en ambientes con características próximas al sistema original. Además se caracterizan por encontrarse en ambientes bien provistos de materia orgánica y buenos niveles de P y N.

Ambas especies poseen componente A alto, lo cual indica que al encontrarlos en un sitio determinado, las probabilidades de que ese sitio pertenezca a PN son altas. No odemos decir lo mismo de la fidelidad, ya que los valores del componente B son bajos, es decir, si se muestrea PN, las probabilidades de encontrar estas dos especies son bajas.

Los grupos **indicadores de SM** (disturbio antrópico intermedio) son: *Eukerria stagnalis* y la superfamilia de ácaros Parasitoidea.

Tabla 5.3: Valores de los componentes A y B del calculo de Inval del Sistema Mixto.

	A	B	p-value
<i>Eukerria stagnalis</i>	1.00000	0.36111	0.001
Parasitoidea	1.00000	0.08333	0.004

Eukerria stagnalis es una especie de lombriz nativa que encontramos exclusivamente en el Sistema Mixto, y que es característica de suelos muy deteriorados (baja estabilidad estructural) y con problemas de drenaje. Es una lombriz muy tolerante a la degradación física del suelo pero mala competidora en ambientes más benignos o en suelos mejor drenados (Momo et al., 2003).

Parasitoidea es una superfamilia perteneciente a los mesostigmata, cosmopolita que habita una amplia variedad de sustratos a nivel del suelo.

Al igual que las especies de lombrices en el PN, *Eukerria stagnalis* y el superfamilia de ácaros Parasitoidea, son buenas indicadores del SM, ya que poseen el componente A con valores iguales a 1. Pero sucede lo mismo con la fidelidad ya que los valores del componente B son bajos.

Los grupos **indicadores de SA** son: *Aporrectodea caliginosa* y la superfamilia Euphthiracaroida.

Tabla 5.4: Valores de los componentes A y B del calculo de Inval del Sistema Agrícola.

	A	B	p-value
<i>Aporrectodea caliginosa</i>	0.8218	0.2083	0.001
Euphthiracaroida	0.9167	0.1111	0.005

Aporrectodea caliginosa es una especie exótica, característica de pasturas, praderas, suelos cultivados o forestados, mientras que Euphthiracaroida es una superfamilia de oribátidos cosmopolita.

En este caso también el análisis arrojó valores de p significativos para una especie de lombriz y una superfamilia de ácaros. Y al igual que en los otros dos sistemas, estos dos grupos indicadores en SA, poseen especificidad (componente A cercanos a 1) pero no fidelidad (componentes B con valores bajos).

A su vez también encontramos algunos grupos que son indicadores de dos de los sistemas:

Llamativamente hay grupos **indicadores del PN y SA** conjuntamente y ellos son: Rhodacaroida y Veigaioida, dos superfamilias de ácaros mesostigmata, los cuales se

caracterizan por ser abundantes en suelos superficiales y subsuperficiales y en acumulaciones de materia orgánica en descomposición.

Isotomidae, Hypogastruridae y Oppiodiea son **indicadores de SM y SA**, es decir son indicadores de suelos antropizados.

Relacionando los resultados de los diferentes análisis realizados (Kruskall Wallis, relación de los grupos taxonómicos con el PCA ambiental y el cálculo del Indval) podemos concluir que:

- ✚ La especie de lombriz *Microscolex dubius* diferencia los ambientes, siendo mas abundante en PN, da significativa en el análisis de PCA donde se correlaciona positivamente con el K y negativamente con el P y según el cálculo del Indval es indicadora de PN.
- ✚ La especie de lombriz *Eukerria stagnalis*, da significativo en el análisis de PCA donde se correlaciona positivamente con N y de manera negativa con RM, Dap, Na, pH y Ca y según el calculo del Indval es indicadora de SM.
- ✚ La superfamilia de ácaros Parasitoidea, resultó significativa en el análisis de PCA donde se correlaciona positivamente con la HR y ligeramente con el N y negativamente con CE y Mg y según el calculo del Indval es indicadora de SM.
- ✚ La especie de lombriz *Aporrectodea caliginosa* diferencia los ambientes, siendo mas abundante en SA; es significativa en el análisis de PCA donde se correlaciona positiva y principalmente con la MO y según el calculo del Indval es indicadora de SA.
- ✚ La superfamilia de ácaros Veigaidoidea, resultó significativa en el análisis de PCA donde se correlaciona positivamente con el K y negativamente con el P y según el cálculo del Indval es indicadora de PN y SA.

- ✚ La superfamilia de ácaros Rhodacaroidea, diferencia los tres ambientes siendo sus abundancias $SA > PN > SM$ y según el cálculo del Indval es indicadora de PN y SA.
- ✚ Las familias de colémbolos Isotomidae y Hypogastruridae diferencian los ambientes PN y SA siendo mayor la abundancia en este último; dan significativas en el análisis de PCA donde se correlacionan positivamente con la Humedad y negativamente con la CE y con los valores de Mg, y según el cálculo del Indval son indicadoras de SM y SA.
- ✚ La superfamilia de ácaros Oppiodiea diferencia los ambientes PN y SA siendo mayor la abundancia en este último y según el cálculo del Indval es indicadora de SM y SA.

BIBLIOGRAFÍA

- Bedano, J.C., Cantú, M.O., Doucet, M.E., 2006. Soil springtails (Hexapoda: Collembola), symphylans and pauropods (Arthropoda: Myriapoda) under different management systems in agroecosystems of the subhumid Pampa (Argentina) *European Journal of Soil Biology* 42: 107–119.
- Bowles, T.M., Acosta-Martínez, V., Calderón, F., Jackson, L.E., 2014. Soil enzyme activities, microbial communities, and carbon and nitrogen availability in organic agroecosystems across an intensively-managed agricultural landscape. *Soil Biology & Biochemistry* 68: 252–262.
- Curry, J.P., 2004. Factors affecting the abundance of earthworms in soils. In: Edwards, C.A. (Ed.), *Earthworm Ecology*. CRC press LLC, Boca Raton, FL, pp. 91–114.
- Curry, J.P., Schmidt, O., 2007. The feeding ecology of earthworms—a review. *Pedobiologia (Jena)*, 50: 463–477.
- De Caceres, M., 2013. How to use the indicpecies package (ver. 1.7.1)
- Decaëns, T., Margerie, P., Renault, J., Bureau, F., Aubert, M., Hedde, M., 2011. Niche overlap and species assemblage dynamics in an ageing pasture gradient in north-western France. *Acta Oecologica*, 37: 212–219.
- Diaz, L., 2002. *Estadística Multivariada: inferencia y métodos*. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. pp 191-198.
- Dufrene, M., Legendre, P., 1997. Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs*, 67(3):345–366.
- Eaton, R.J., Barbercheck, M., Buford, M., Smith, W., 2004. Effects of organic matter removal, soil compaction, and vegetation control on Collembolan populations, *Pedobiologia (Jena)* 48: 121–128.
- Felten, D., Emmerling, C., 2011. Effects of bioenergy crop cultivation on earthworm communities – A comparative study of perennial (*Miscanthus*) and annual crops with consideration of graded land –use intensity. *Appl Soil Ecol* 49, 167–177.
- Fierer, N., Strickland, M.S., Liptzin, D., Bradford, M.A., Cleveland, C.C., 2009. Global patterns in belowground communities. *Ecol. Lett.* 12.
- Holt, J. A., 1985. Acari and Collembola in the litter and soil of three north Queensland rain forest. *Austral Ecology* 10 (1): 57-65.

- Hopkin, S.P., 1997. *Biology of springtails (Insecta: Collembola)*. Oxford University Press, Oxford. 333 p.
- Momo, F. R., Falco, L.B., Craig, E.B., 2003. Las lombrices de tierra como indicadores del deterioro del suelo. *Revista de Ciencia y Tecnología* 8: 55 – 63.
- Scheu, S. 2002. The soil food web: structure and perspectives. *European Journal of Soil Biology*. 38:11.
- Takeda, H., 1981. Effects of shifting cultivation on the soil mesofauna with special reference to collembolan population in the north-east Thailand. *Memoirs of the College of Agriculture, Kyoto University* 118:45-60.
- Trasar, M.C., Leirós, M.C., Gil, F., 2000. Biochemical properties of acid soils under climax vegetation (Atlantic oakwood) in an area of the European temperate-humid zone (Galicia, NW Spain): specific parameters. *Soil Biology & Biochemistry* 32: 747-755.
- Vallejo-Quintero V.E., 2013. Importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de suelos mediante el componente microbiano: experiencias en sistemas silvopastoriles. *Colomb. for.* vol.16 no.1.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

Conclusiones

Realizar una tesis doctoral significa emprender un camino largo pero enriquecedor. Si bien se parte con el planteo de una hipótesis, a lo largo de su recorrido se van presentando nuevos interrogantes y muchas veces las respuestas que se van obteniendo no son las que se esperaban en un primer momento.

En este camino, ya desde el principio se obtuvieron resultados novedosos e inesperados. Frente a la tarea de extracción de la mesofauna del suelo, mientras que en la mayoría de la bibliografía el método más utilizado y más efectivo es el Embudo de Berlese - Tullgren, en este caso resultó más eficiente el método de flotación con sulfato de magnesio. Para los colémbolos la eficiencia de la técnica de flotación fue aproximadamente 7 veces mayor que la del embudo, para los oribátidos esta eficiencia fue 18 veces mayor, así como también para los prostigmatas y mesostigmatas la abundancia obtenida fue mayor mediante el método flotación (Sandler et al, 2010).

Estos resultados coinciden con los de algunos autores (Macfadyen, A., 1967; Yoshida y Hijii, 2008) y no coinciden con los de otros (El-Kifl, A.H., 1957; Wood, T.G., 1965), por lo que una de las conclusiones a la cual se llegó es que la eficiencia de los diferentes métodos de extracción de fauna del suelo depende de las características del suelo en el cual se están realizando los estudios, y que los diferentes métodos de extracción operan con diferente eficiencia dependiendo de la naturaleza del suelo, y del tamaño y la movilidad de los organismos a los cuales se quiera evaluar.

Ahora bien, en el comienzo de este recorrido, se planteó un gradiente de deterioro basado en la intensidad de uso del suelo, el cual se supuso a priori debía reflejar diferencias en las comunidades de organismos edáficos. Con esta hipótesis se plantearon los objetivos que se mencionan en el capítulo I, y cuyas conclusiones se describen a continuación:

Objetivo I

“Caracterizar los tres sistemas de uso de suelo seleccionados desde el punto de vista físico-químico.”

El análisis de las variables físico – químicas, nos permite tener un conocimiento bastante amplio del estado ambiental de los diferentes sitios de muestreo.

Las variables presentan diferencias entre los sistemas, demostrando que las diferentes prácticas afectan sus valores, con lo cual se ve claramente que los tres sistemas de uso son, ambientalmente hablando, diferentes.

Objetivo II

“Determinar si las diferencias en la intensidad de uso del suelo se relacionan con diferencias en la actividad microbiana, medida a través de la respiración edáfica y la actividad nitrogenasa.”

Los resultados obtenidos en esta tesis para las variables microbiológicas son consistentes con un impacto diferencial según el uso del suelo. Así, la respiración resultó $PN > SM > SA$ y la actividad de la nitrogenasa resultó mayor en PN que en el sistema agrícola.

Estos resultados son significativos en el marco del uso sustentable del recurso suelo, pues apoyan la hipótesis de que monitorear cambios en el funcionamiento de la biota del suelo permiten anticipar un posible proceso de degradación.

Objetivo III

“Identificar los grupos de organismos pertenecientes a la macro y mesofauna que sean sensibles a los diferentes grados de intensidad de uso a través del análisis de parámetros de sus comunidades.”

En el siguiente grafico se muestra como resumen, un listado de los grupos taxonómicos que se encontraron en mayores abundancias en cada uno de los sistemas estudiados.



Por otro lado el cálculo del Indval nos mostró que:

- ✓ Los grupos **indicadores de PN (bajo disturbio antrópico)** son: *Microscyles dubius* y *M. phosphoreus*.
- ✓ Los grupos **indicadores de SM** (disturbio antrópico intermedio) son: *Eukerria stagnalis* y la superfamilia de ácaros Parasitoidea.
- ✓ Los grupos **indicadores de SA** son: *Aporrectodea caliginosa* y la superfamilia Euphthiracaroidea.

Objetivo IV

“Evaluar la correlación entre los grupos seleccionados en los puntos 1 y 2, y las variables físicas y químicas medidas.”

El análisis de las variables físico – químicas mostró una diferenciación entre los ambientes, pero no en el gradiente de deterioro postulado a priori. Las correlaciones entre los grupos taxonómicos seleccionados y las variables físico – químicas, analizadas mediante un análisis de PCA muestran un comportamiento esperado de estas relaciones, a su vez que la posterior incorporación de las superficies de respuesta en el análisis, resaltan el comportamiento no lineal de estos grupos con el ambiente definido por las variables físico – químicas. Este resultado demuestra que el efecto que los sistemas de manejo tienen sobre las comunidades edáficas, son muy complejos y diversos.

Los grupos que resultaron significativos en el análisis de PCA ambiental y que debido a esto pueden ser consideradas indicadoras de determinadas variables ambientales fueron:

- 1) Variable microbiológica: ARA
- 2) Familias de Colémbolos: Hypogastruridae, Isotomidae, Entomobrydae, Symphleona.
- 3) Super familias de Ácaros: Oripodoidea, Parasitoidea, Veigaidoidea.
- 4) Especies de Lombrices: *Aporrectodea caliginosa*, *Eukerria stagnalis*, *Octolasion cyaneum*, *Microscolex dubius*.

Objetivo V

“A partir de la información obtenida generar índices de la calidad de suelo que permitan evaluar y detectar problemas en el funcionamiento del suelo y facilitar la identificación de sistemas de uso adecuados que permitan implementar procesos de recuperación de este.”

Los resultados de esta tesis muestran que los propios organismos evaluados a lo largo del estudio fueron mostrando el estado ambiental de los suelos muestreados. Lo que se estipuló a priori como un gradiente de deterioro no fue tal, así, las prácticas

agrícolas intensivas aplicadas en los sitios muestreados no produjeron el efecto degradatorio que se suponía estaban produciendo, y los pastizales no antropizados no presentaron las condiciones prístinas que se creía iban a presentar. Por otro lado, las variables físicas y químicas analizadas mediante el análisis de discriminante diferenciaron los sistemas analizados entre sí, pero tampoco mostraron el gradiente estipulado a priori. Estos resultados, junto con los del análisis del comportamiento de la biota edáfica, si bien dificultaron la concreción de este objetivo, mostraron que los organismos del suelo resultan buenos indicadores de las relaciones no lineales típicas de los sistemas biológicos.

Algunas posibles razones de estos resultados son, por un lado las prácticas agrícolas aplicadas en los campos muestreados las cuales son prácticas conservacionistas. Aplicar buenas prácticas de manejo, implica utilizar diferentes mecanismos a lo largo de todo el proceso de producción agrícola. Estas prácticas promueven la protección del ambiente, el bienestar de las personas y la obtención de productos de calidad. Con ellas se logra una menor contaminación del agua y el suelo, un manejo racional de los agroquímicos, y la preservación de la biodiversidad, así como del recurso suelo. En esta tesis se vio que en el SA luego de la cosecha, se procedía a dejar una buena cobertura de rastrojo, permitiendo contar con una muy importante cantidad de MO, fuente de alimento para las comunidades edáficas, así como una fuente de protección contra la erosión hídrica y eólica y un buen mecanismo para mantener la temperatura y humedad para el buen desarrollo de las comunidades edáficas. Es decir, las prácticas aplicadas en el sistema agrícola producen niveles de las variables ambientales, propicias para el desarrollo de las comunidades edáficas. Y en el otro extremo, los pastizales naturalizados presentan niveles de ciertas variables, como por ejemplo Dap, RM y Ce, que indican un cierto grado de deterioro, que puede ser consecuencia o bien del efecto indirecto de las prácticas agrícolas de los campos linderos, o bien de la historia previa que hizo que estos campos de por sí ya presentaran una calidad agronómica baja para el buen desarrollo de las comunidades vegetales y animales.

Además en los campos agrícolas se aplicaron agroquímicos y se incorporaron nutrientes de manera consciente y adecuada tanto en sus contenidos como en sus cantidades. Una fertilización adecuada implica planificar la frecuencia y cantidad de fertilizante de acuerdo a las características del suelo y los requerimientos del cultivo y la correcta utilización de agroquímicos produce la eficacia deseada en el control de plagas, enfermedades y malezas.

Las prácticas agrícolas no son las “dañinas” en sí mismas, sino que dependiendo de cómo y en qué intensidad se las aplique, serán los efectos que produzcan en el ambiente edáfico y en las comunidades que en él habitan. La idea inicial indicaba que toda práctica agrícola iba a tener un efecto negativo con respecto a los suelos no antropizados, pero todos los análisis realizados mostraron que las respuestas no son lineales y que al ser el ambiente edáfico un sistema complejo e inestable es muy difícil predecir cómo se van a comportar las comunidades de organismos, que además en sí mismas también son muy complejas.

Todas estas conclusiones fueron siendo replanteadas a medida que los resultados de los análisis fueron haciéndome repensar las ideas iniciales. Por tal motivo, en este caso, se puede hablar de sitios con intromisión antrópica y otros que no, pero no se puede decir que este manejo antrópico produce necesariamente signos de degradación teniendo siempre en consideración las variables ambientales agronómicas que se evaluaron y los parámetros evaluados de las comunidades de ácaros, colémbolos, lombrices y la actividad microbiológica.

En virtud de los resultados anteriormente mencionados, que muestran en cierta medida, las dificultades para construir un índice biológico de calidad del suelo y en función de la gran cantidad de datos e información recolectada en este estudio es que se decidió concentrarse en el análisis de las comunidades edáficas y con ellas, en la obtención de indicadores biológicos de la calidad del suelo.

Los análisis de las comunidades de organismos de la microflora, meso y macrofauna mostraron la complejidad de este ecosistema suelo. Con los análisis de abundancia, riqueza y diversidad se ha logrado determinar que las diferentes prácticas agrícolas producen cambios en el suelo que afectan a las comunidades de organismos modificando estos parámetros en diversos sentidos y que estas comunidades son capaces de reflejar dichos cambios.

Así, las características que presentan los Pastizales Naturalizados, producen aumento en la actividad microbiológica, la cual se ve reflejada en los niveles de respiración y actividad nitrogenasa, mientras que el manejo hace que en el Sistema Mixto y en el Sistema Agrícola disminuye sus niveles relativos a aquellos. Las variables microbiológicas medidas son importantes ya que describen el funcionamiento del ecosistema edáfico cuyos procesos microbianos determinan en gran parte la descomposición de la materia orgánica, el ciclado de nutrientes y la incorporación de nitrógeno atmosférico entre otros servicios ecosistémicos.

La comunidad de colémbolos evaluada a través de sus familias, resultó presentar valores de sus variables (riqueza, diversidad y abundancia) más altos en ambientes antropizados, y menores en el pastizal naturalizado. El índice de grado de cambio de Cancela Da Fonseca, el cual es un índice que mide las variaciones de varios parámetros de la comunidad en su conjunto entre ambientes, planteó un gradiente SA > SM > PN, que nos muestra que todas estas variables integradas también presentan las mismas diferencias que el análisis de los parámetros por separado. Sus relaciones con las variables ambientales, evaluadas a través del PCA ambiental y de las superficies de respuesta, mostraron comportamientos esperados con variables ambientales específicas, y comportamiento claramente no lineal con el ambiente definido por estas variables. Las familias Isotomidae e Hypogastruridae fueron detectadas por el Indval como indicadores de sistemas antropizados (SM y SA).

Dentro de la comunidad de ácaros, la cual posee una alta diversidad de respuestas, se deben resaltar: una mayor riqueza en el SA y una mayor diversidad en el

SM. Dentro de las variaciones en sus abundancias, se destacan: la superfamilia Bdelloidea con mayores abundancias en el PN, la superfamilia Lohmannioidea con mayores abundancias en el SM y la superfamilia Rhodacaroidea la cual presento valores más altos en el SA. El índice de grado de cambio planteó al igual que para los colémbolos, un gradiente SA > SM > PN. Sus relaciones con las variables ambientales, evaluadas a través del PCA ambiental, mostraron respuestas tales como la de la superfamilia Oripodoidea que se relaciona positivamente con la MO y la Hr, la superfamilia Parasitoidea que se relaciona positivamente con la Hr y ligeramente con el N y negativamente con CE y Mg, y la superfamilia Veigaidoidea, que se relaciona positivamente con el K y negativamente con el P. Es importante también resaltar el comportamiento, mostrado en las superficies de respuestas, de las superfamilias Oripodoidea y Veigaidoidea que resultaron comportarse de manera lineal con el hábitat definido por las variables físico – químicas. El calculo del Indval detecto a la superfamilia Parasitoidea como indicadora del SM y a la Euphthiracaroidea como indicadora del SA, así como detecto a la superfamilia Oppiodiea como indicadora de los sistemas antropizados (SM y SA) y sorprendentemente detecto dos superfamilias (Rhodacaroidea y Veigaidoidea) como indicadoras del PN y SA conjuntamente, resultado que deberá investigarse mas profundamente, posiblemente a un mayor nivel de resolución taxonómica.

Dentro de la comunidad de lombrices los puntos a resaltar son: iguales riquezas entre los sistemas, y mayores diversidades en los sistemas PN y SA. Las sp. *Aporrectodea caliginosa*, *Eukerria stagnalis*, *Octolasion cyaneum*, *Microscolex dubius* resultaron significativas en el análisis de PCA ambiental, mostrando también respuestas no lineales en el análisis de superficies de respuesta. De estas cuatro especies, tres fueron detectadas por el Indval como indicadoras de un sistema de uso: *Microscolex dubius* de PN, *Eukerria stagnalis* de SM y *Aporrectodea caliginosa* de SA.

Todas estas respuestas diferenciales y no lineales ponen de manifiesto la real complejidad de desarrollar un índice biológico de calidad del suelo, además de resaltar el efecto de las prácticas de manejo y como es que resulta muy difícil el generalizar

sobre el resultado que ellas ejercen sobre la tan compleja y variable comunidad de biota edáfica.

Como corolario final, quedan nuevos interrogantes que deberán ser dilucidados con futuras investigaciones: ¿Es posible desarrollar un índice biológico de calidad del suelo que permita generalizar el efecto de las prácticas agrícolas sobre las comunidades de organismos edáficos? ¿Es correcto generalizar y predecir el efecto negativo que tienen las prácticas agrícolas sobre el medio edáfico y sus comunidades?

Solo nos queda seguir navegando en nuestro espíritu inquieto y nunca dejar de hacernos preguntas y trabajar para responderlas.

BIBLIOGRAFÍA

- El-Kifl, AH. 1957. Comparison between a wet and a dry method for extraction of soil arthropod fauna. Bull. Soc. ent. Egypt. 41: 525-6.
- Macfadyen, A. 1967. Methods of investigation of productivity of invertebrates in terrestrial ecosystems. Pp. 383–412 in: K. Petruszewicz (ed.). Secondary productivity of terrestrial ecosystems.
- Sandler R.V., Falco L.B., Di Ciocco C., de Luca R., Coviella C.E., 2010. Eficiencia del embudo Berlese-Tullgren para extracción de microartrópodos en suelos argiudoles típicos de la provincia de buenos aires. Ci. Suelo 28 (1): 1-7.
- Yoshida Tomohiro & Naoki Hijii. 2008. Efficiency of extracting microarthropods from the canopy litter in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) plantation: a comparison between the washing and Tullgren methods. J. For. Res. 13: 68–72.
- Wood, TG. 1965. Comparison of a Funnel and a Flotation Method for Extracting Acari and Collembola from Moorland Soils. Pedobiologia 5: 131-139.

ANEXO I: Métodos de determinación de las variables físico - químicas

DAP: Método del cilindro (Forsythe, 1975)

En este método se utiliza un sacabocado, el cual cuenta con un extremo de borde biselado que permite su penetración en el suelo. Se introduce y se extrae un cilindro de suelo de 10 cm de alto y 5 cm de diámetro. La muestra se coloca cuidadosamente en una bolsa y se la lleva al laboratorio donde primero se pesa en un recipiente de aluminio tarado y luego se lleva a estufa a 105°C hasta peso constante, donde se vuelve a pesar y se calcula el porcentaje de humedad de la muestra.

Cálculo de densidad aparente:

$$\text{Dap (unidades)} = \frac{\text{peso seco de la muestra}}{\text{volumen del cilindro}}$$

Humedad:

El método para medirla es por diferencia de peso, entre el suelo húmedo y el suelo por secado a estufa a 105 °C durante dos horas. El volumen de suelo medido fue el de la misma muestra utilizada para el cálculo de densidad aparente.

$$\% \text{ humedad} = \frac{\text{peso del suelo húmedo} - \text{peso del suelo seco}}{\text{peso del suelo seco}} \times 100$$

Resistencia Mecánica: penetrómetro

La resistencia del suelo a la penetración se midió a campo, usando un penetrómetro de cono (Al-Adawi y Reeder 1996; Hamza y Anderson 2005) con un ángulo de 30 ° (norma ASAE S 313) a profundidades de 0 a 20 cm, con intervalos cada 5 cm de profundidad y se llevaron a cabo en los mismos puntos en los que se evaluaron las demás variables. Los valores medidos se expresan en Kg/cm², y se corresponden con el valor máximo encontrado para cada segmento de 5 cm de profundidad.

Conductividad eléctrica: conductímetro

La Conductividad eléctrica se mide sobre soluciones del suelo, que pueden ser en extracto de saturación o soluciones más diluidas. El método estándar surge de medir la conductividad de un cubo de solución iónica, de 1 cm de lado, actuando de conductor entre dos electrodos de 1 cm² de superficie.

Así la CE, es el valor determinado entre las dos caras opuestas del cubo.

Las determinaciones se realizaron con un conductímetro que da la lectura en forma directa, con una relación: 1:2,5 v/v

pH: Método potenciométrico

Se mide la diferencia en potencial eléctrico entre las terminales de dos semielectrodos sumergidos en la solución a medir. En uno de los semielectrodos el contacto con la solución se establece por medio de una membrana de vidrio especial, en el otro por medio de un puente salino.

La diferencia de potencial indicada por un microvoltímetro es proporcional al pH de la suspensión.

La medición se realizó sobre las mismas muestras en las que se determinó la CE.

Materia Orgánica: Método de Walkley-Black (modificado).

Reactivos

- 1) SO₄ H₂ (c) mínimo 96% de título.
- 2) K₂ Cr₂ O₇ 1N
- 3) K₂ Cr₂ O₇ 1000 N
- 4) Fe (NH₄)₂ (SO₄)₂ .6H₂O o, 3N (sal de Mohr)
- 5) Indicador: n-fenilantranílico 0.1% en solución de Na₂CO₃ al 0,2%.

Técnica

A) Oxidación de la muestra: Se pesa el suelo seco y tamizado y se coloca en un tubo de ensayo. Se agregan 3 ml de K₂ Cr₂ O₇ 1N y 6 ml de SO₄ H₂, se agita y deja en reposo 20 minutos a temperatura ambiente. Luego se agrega H₂O destilada hasta aproximadamente la mitad del tubo, se agita y deja enfriar 20 minutos.

B) Titulación: Se agrega a cada tubo 3 gotas del indicador y se titula con sal de Mohr 0.3N.

C) Cálculo:

l) Cálculo de la normalidad de la sal de Mohr:

$$N \text{ Sal} = 3 \text{ (meq)} / \text{Vol. Sal (ml)}$$

II) % C T del patrón de suelo: (esta determinación se realiza cada vez que se renueva el patrón suelo).

$$\% \text{CT} = (V_b - V_p) \times N_{\text{sal}} \times 300 / P_p \text{ (mg)} \times 0,82$$

0,82 = factor de corrección porque el método asume que se oxida el 82% del carbono orgánico en el suelo.

$$\% \text{M.O.} = \% \text{C orgánico} \cdot 1,724$$

Nitrogeno: Kjeldahl

MATERIAL

Matraz Kjeldahl, Pipetas de 10 y 25 ml, Vaso de precipitado de 250 ml, Bureta, Agitador magnético

REACTIVOS

Ácido sulfúrico concentrado, Catalizador Kjeldahl (Se), Hidróxido sódico en solución al 30%, Indicador Shiro-Tashiro, Fenolftaleina, Ácido Bórico en solución al 4%, Ácido sulfúrico 0,005 N, Carbonato sódico anhidro.

MÉTODO

Introducir dos gramos de suelo en un matraz Kjeldahl agregando a continuación una pastilla de catalizador Kjeldahl (Se) y 10 ml de ácido sulfúrico concentrado. Mineralizar en el bloque digestor durante una hora a 100 °C y, a continuación, durante una hora y treinta minutos a 350 °C. Enfriar.

Añadir a cada muestra 20 ml de agua destilada y unas gotas de fenolftaleina y colocar en el destilador Kjeldahl. Colocar el vaso de precipitado con 25 ml de ácido bórico en la salida del destilado. Añadir al matraz Kjeldahl hidróxido sódico hasta que vire de color. Destilar hasta recoger entre 100 y 150 ml de destilado en el vaso de precipitado.

Valorar con ácido sulfúrico 0,005 N hasta que la muestra vire a rojo.

Calcular el factor de corrección del ácido sulfúrico valorando entre 0,01 y 0,02 gramos de carbonato sódico anhidro con el ácido sulfúrico 0,005 N.

CALCULOS

$$\% \text{N} = (\text{v. de ácido sulfúrico utilizado en la valoración} \times \text{factor de corrección} \times 14) / 4000$$

Fósforo: Kurtz y Bray

SOLUCIÓN EXTRACTANTE KyB N°1: Se pesan 1,11 g de FNH_4 y se agrega 4,16 ml de HC1 6 N (HC10,025 N), se lleva a 1 litro con agua.

SOLUCIÓN EXTRACTANTE KyB N° 2: Se pesa 1,11 g de FNH_4 y se agrega 16,66 ml de HC1 6 N (HC10,1 N), se lleva a 1 litro con agua.

ACIDO ASCÓRBICO: 3,52 g de A Ascórbico y se lleva a 1 litro con agua.

MEZCLA SULFOMOLIBDICA:

1) 2,5 g de molibdato de amonio en 200 ml de agua. Se calienta sin llevar a ebullición.

2) 40 ml de H_2SO_4 más 700 ml de agua.

3) se enfrían ambas y se agrega 2 a 1, se lleva a 1 litro con agua.

Solución patrón de 25 ppm de P

Se pesan 0,1098 g de $\text{PO}_4\text{H}_2\text{K}$ seco y se llevan a un litro (se guarda en plástico o vidrio común limpio con HCl).

PROCEDIMIENTO

a) Se pesan 1,43 g de muestra, por duplicado (en frasco con tapa de 100 ml).

b) Se agrega 10 de extractante KURTZ Y BRAY 1 o 2.

c) Se agita durante 1 minuto.

d) Se filtra en frascos sobre papel y se recibe en frascos plásticos o de vidrio.

e) Se toma una alícuota de 1 ml y se pone en tubo de ensayo.

f) Se agrega 5 ml de ascórbico y 5 ml de mezcla sulfomolibdica.

g) Se calienta en baño maría a $100\text{ }^\circ\text{C}$ durante 20 minutos.

h) Una vez frío se lee a 640 nm.

Sodio y Potasio: fotometría de llama.

Se emplea una sal de un catión saturante (Acetato de amonio $\text{AC}^- \text{NH}_4^+$), el cual se adsorbe en las partículas coloidales del suelo y desplaza hacia la solución a los cationes de intercambio. La cantidad de Sodio desplazada se determina y expresa en $\text{cmolc} \cdot \text{kg}^{-1}$ de suelo seco.

Reactivos

- Acetato de amonio 1N, $\text{pH}=7 \pm 0,1$

Principios

Se satura el suelo con acetato de amonio 1N (el amonio actúa como catión saturante) a pH 7.

Técnica

1. Etapa de Extracción de Cationes intercambiables

- Colocar 2 g de suelo en un tubo de percolación (2,5 cm de diámetro interno x 10 cm de largo) y agregar aproximadamente 50 ml de acetato de amonio 1N.
- Completar cada matraz con agua hasta 100 ml y agitar.

Se emplea una escala, donde el cero del medidor del fotómetro corresponde a la nebulización de agua destilada y la división media a la nebulización de una solución que contiene 0,4 meq/l de sodio.

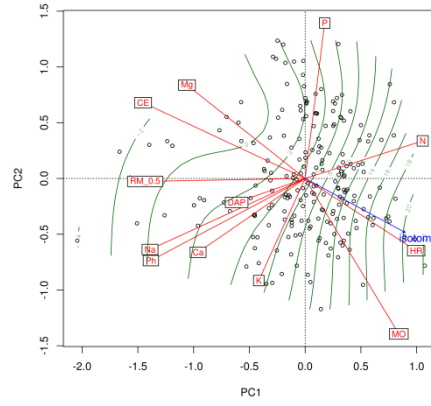
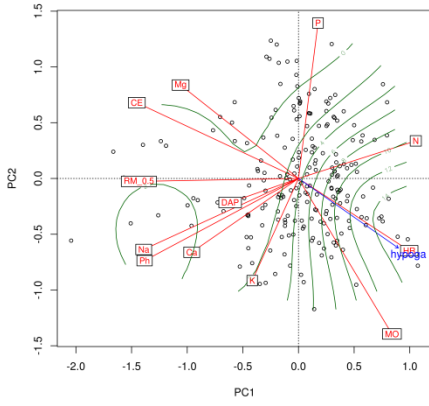
Se realiza una curva con patrones de 0,2; 0,4 y 0,6 cmolc.l^{-1} .

Calcio y Magnesio: complejometría de EDTA

En primer término se determina la suma de Ca y Mg usando como indicador Negro de Eriocromo T y a continuación dureza debida a Ca, usando como indicador Murexida o Calcón en medio alcalino, de manera que el magnesio esté precipitado como hidróxido.

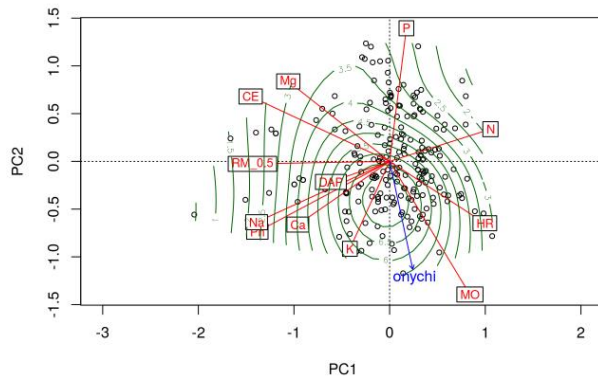
ANEXO II: Superficies de respuesta de todos los grupos taxonómicos encontrados

Colémbolos

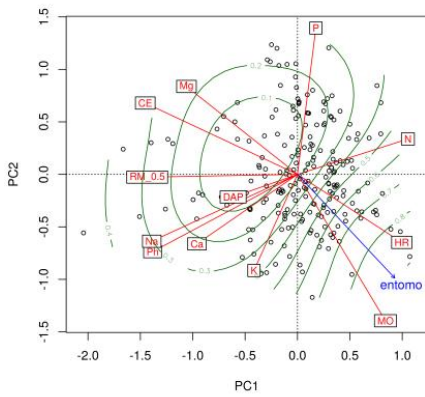


Familia Hypogasstruridae

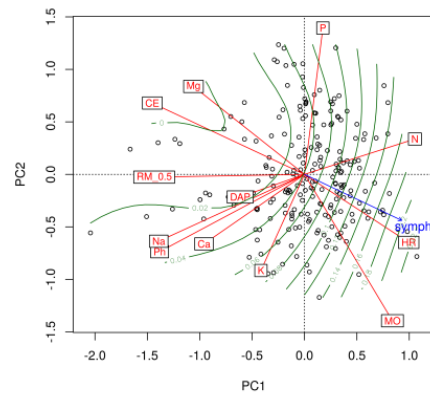
Familia Isotomidae



Familia Onychiuridae

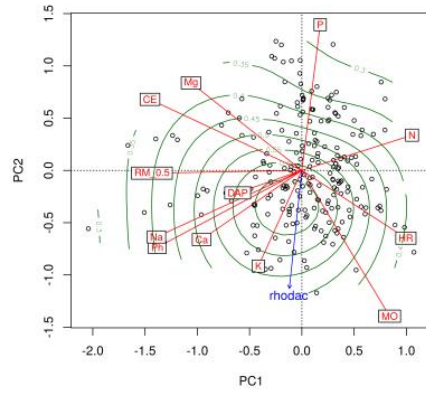
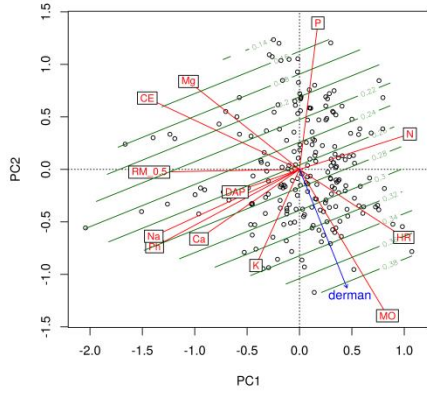


Familia Entomobryidae

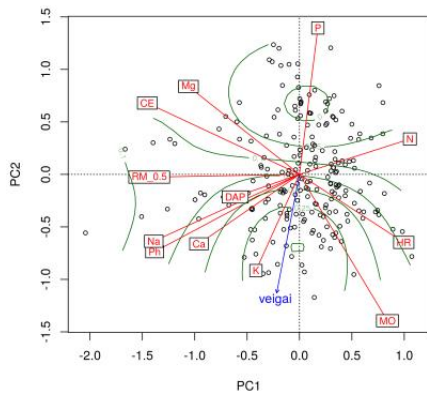


Familia Katiannidae

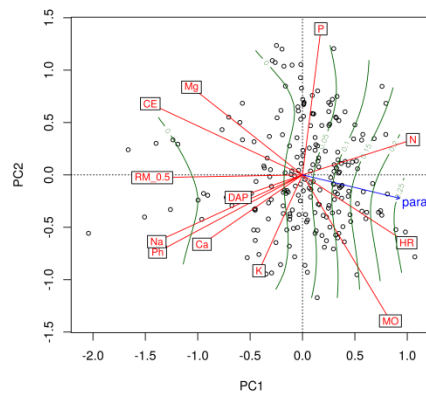
Ácaros



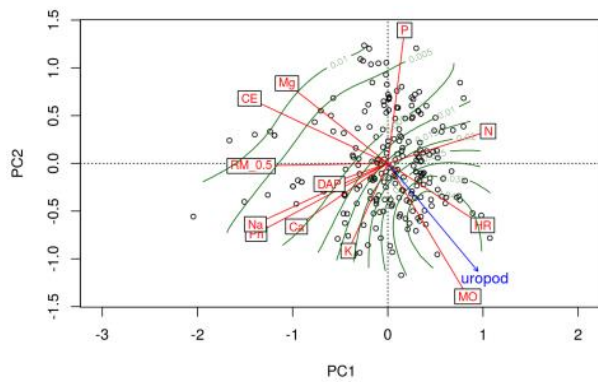
Superfamilia Dermanyssoidea



Superfamilia Rhodacaroidea

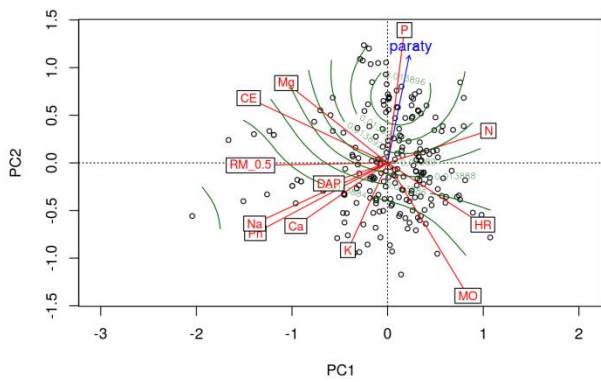


Superfamilia Veigαιοidea

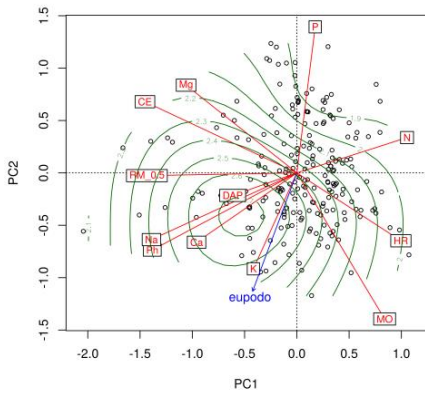


Superfamilia Parasitoidea

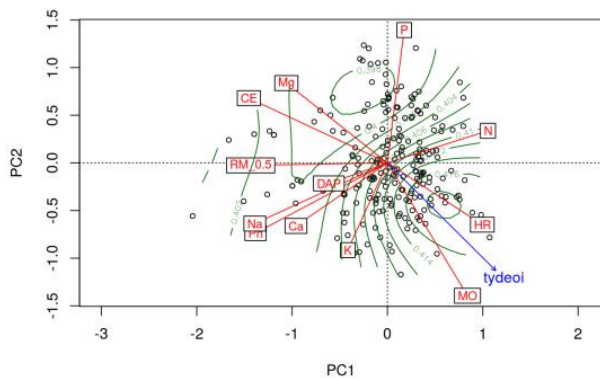
Superfamilia Uropodoidea



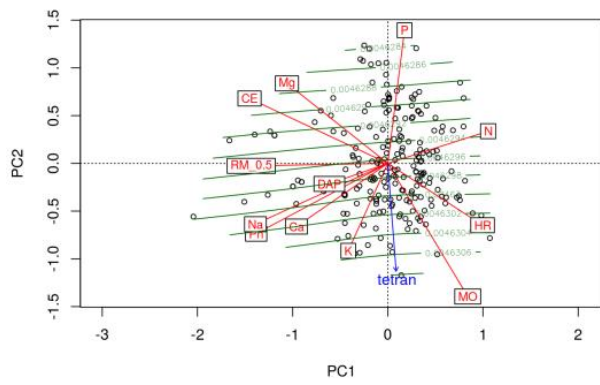
Superfamilia Paratydeoidea



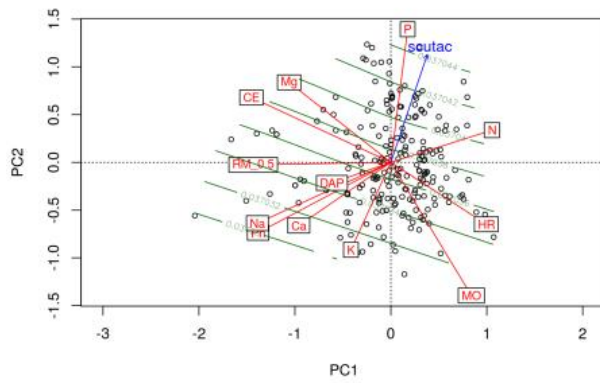
Superfamilia Bdelloidea



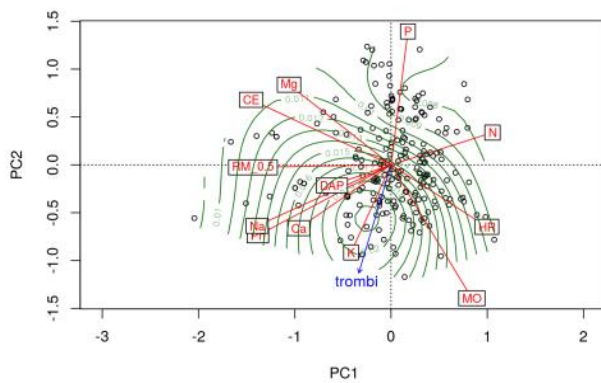
Superfamilia Tydeoidea



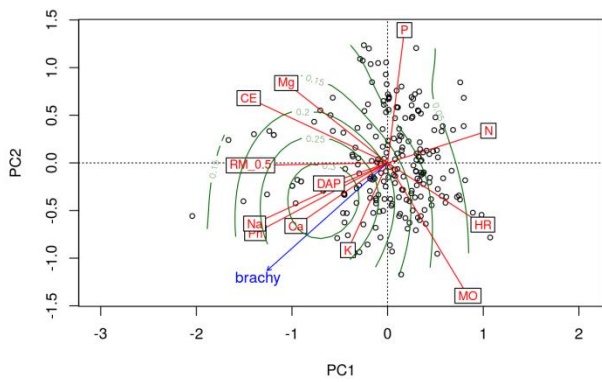
Superfamilia Tetranychioidea



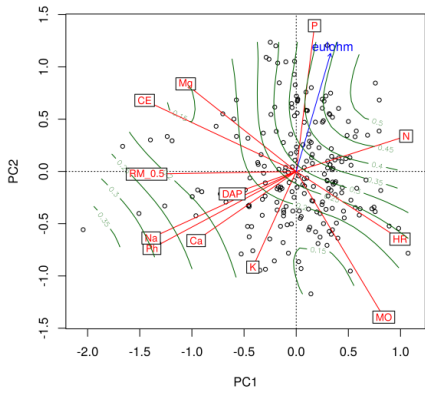
Superfamilia Scutacaroida



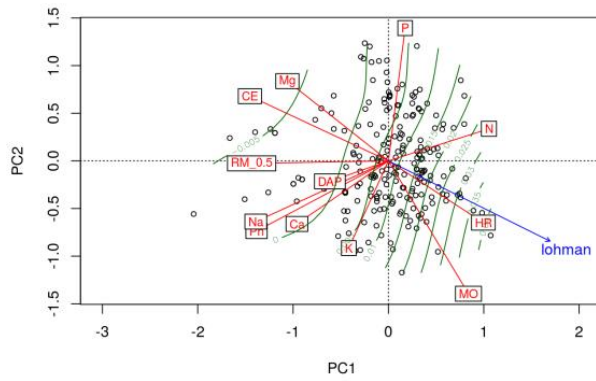
Superfamilia Trombidioidea



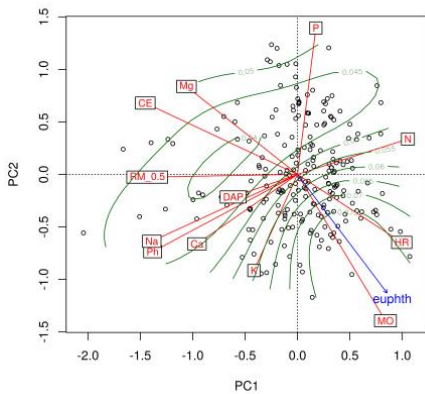
Superfamilia Brachychthonoidea



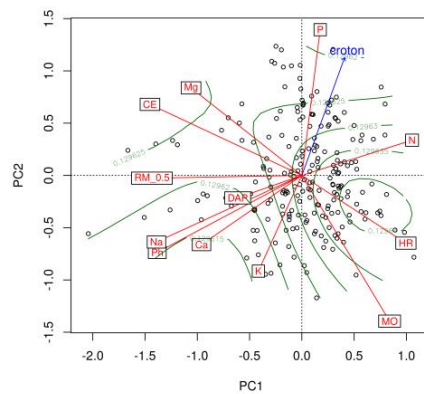
Superfamilia Eulohmannioidea



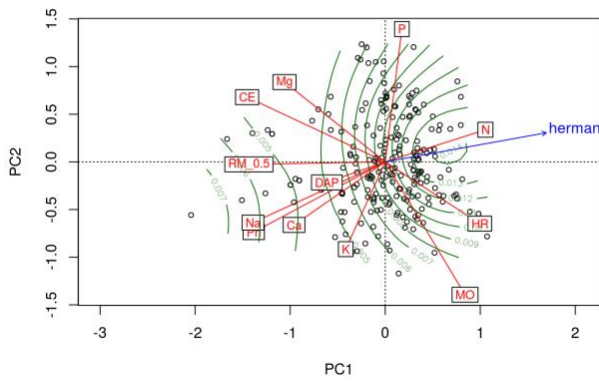
Superfamilia Lohmannioidea



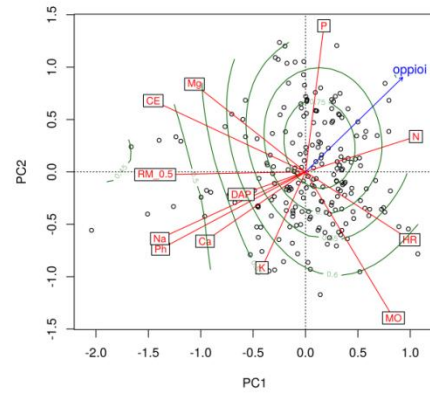
Superfamilia Euphthiracaroida



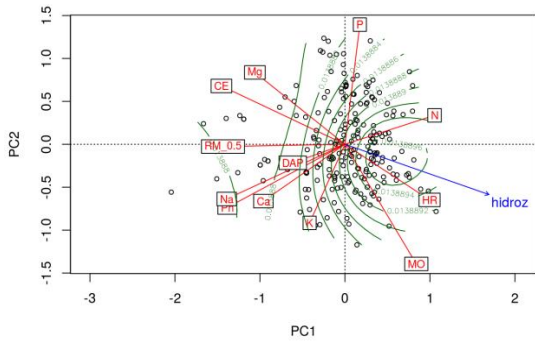
Superfamilia Crotonioidea



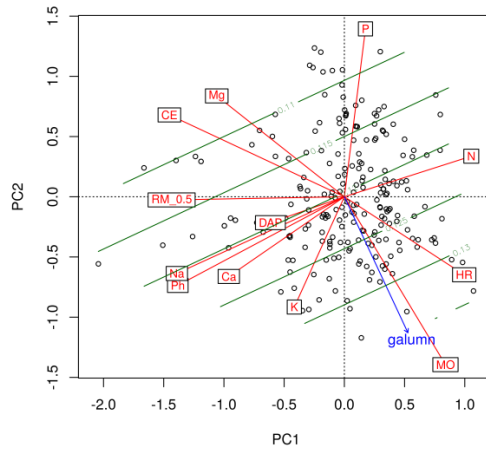
Superfamilia Hermannioida



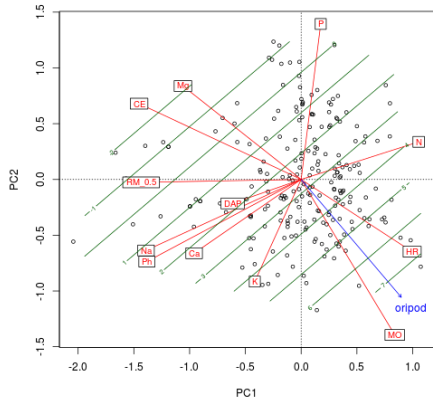
Superfamilia Oppioidea



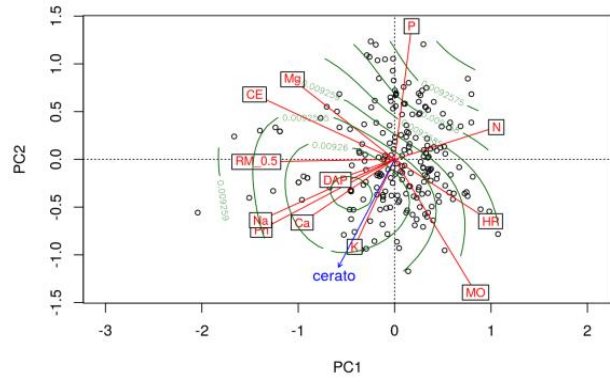
Superfamilia Hydrozetoidea



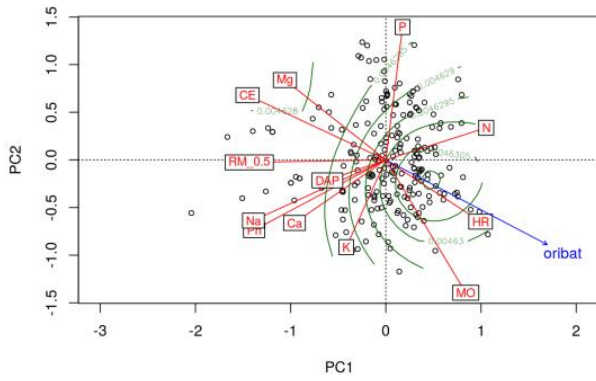
Superfamilia Galumnoidea



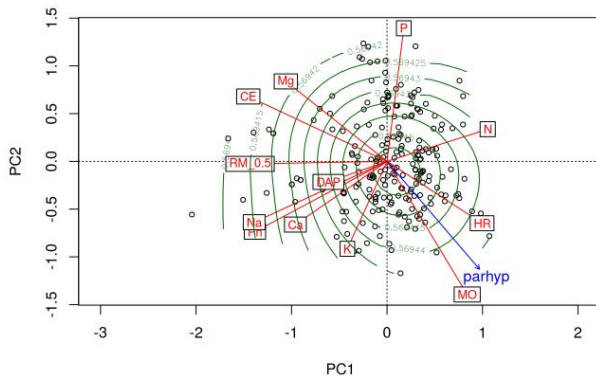
Superfamilia Oripodoidea



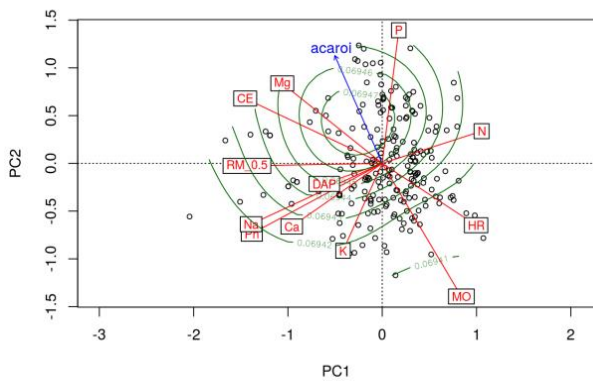
Superfamilia Ceratozetoidea



Superfamilia Oribatelloidea

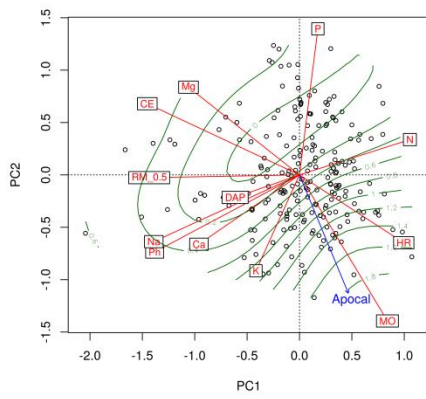


Superfamilia Parhypochthoniidea

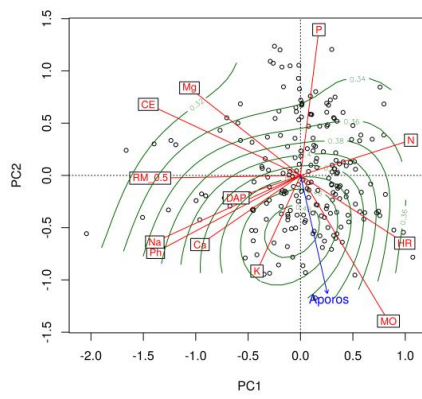


Superfamilia Acaroidea

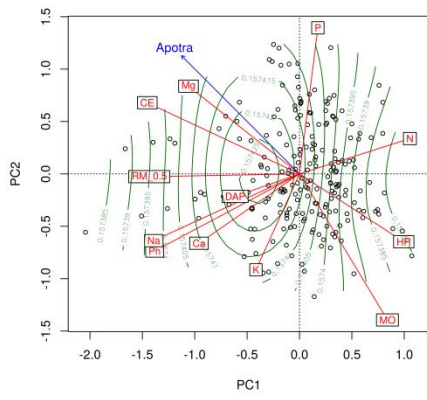
Lombrices

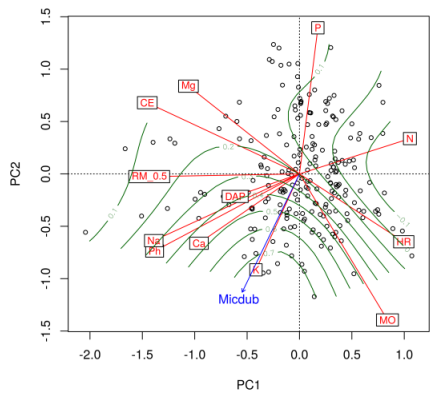


Aporrectodea caliginosa

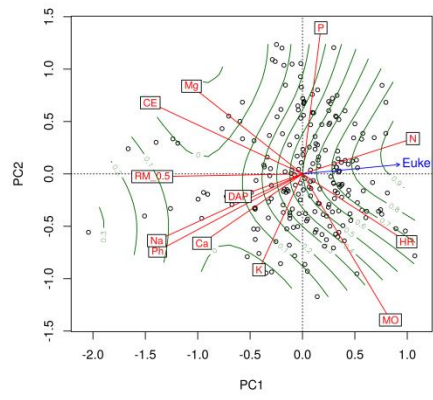


Aporrectodea rosea

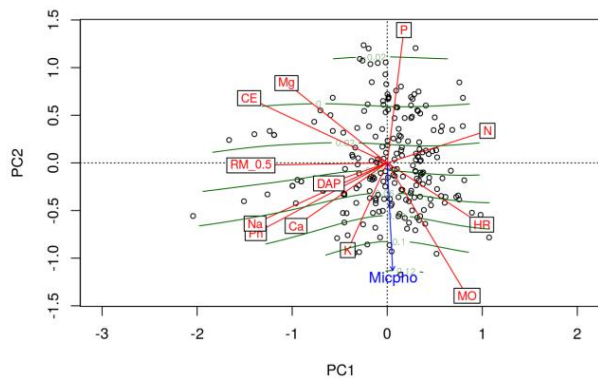




Microscolex dubius



Microscolex phosphoreus



Eukerria stagnalis

ANEXO III: Publicaciones y presentaciones a congresos

Publicaciones

- ✓ **Rosana V. Sandler**, Liliana B. Falco, César A. Di Ciocco, Ricardo Castro Huerta, Carlos E. Coviella (2017) (Hexapoda: Collembola) community structure related to anthropic soil disturbance. Rev. FCA UNCUYO, X. ISSN impreso 0370-4661. ISSN (en línea) 1853-8665.
- ✓ Falco L, **Sandler R**, Momo F, Di Ciocco C, Saravia L, Coviella C. (2015) Earthworm assemblages in different intensity of agricultural uses and their relation to edaphic variables. *PeerJ* 3:e979 <https://dx.doi.org/10.7717/peerj.979>
- ✓ Ricardo A. Castro-Huerta, Liliana B. Falco, **Rosana V. Sandler** and Carlos E. Coviella (2015) Differential contribution of soil biota groups to plant litter decomposition as mediated by soil use. *PeerJ* 3:e826; DOI 10.7717/peerj.826
- ✓ **Sandler RV**, Falco LB, Di Ciocco CA, Castro-Huerta R, Coviella CE. 2014 The degree of change of collembolan community structure related to anthropic soil disturbance. *PeerJ PrePrints* 2:e721v1 <https://dx.doi.org/10.7287/peerj.preprints.721v1>
- ✓ Cesar A. Di Ciocco, **Rosana V. Sandler**, Liliana B. Falco, Carlos E. Coviella. (2014). Actividad microbiológica de un suelo sometido a distintos usos y su relación con variables físico-químicas. Rev. FCA UNCUYO. 2014. 46(1): 73-85. ISSN impreso 0370-4661. ISSN (en línea) 1853-8665.
- ✓ **Rosana V. Sandler**, Liliana B. Falco, Cesar Di Ciocco, Romina de Luca, Carlos E. Coviella. (2010). Eficiencia del embudo Berlese-Tullgren para extracción de microartrópodos en suelos argiúoles típicos de la provincia de buenos aires. *Ci. Suelo* 28 (1): 1-7.

Presentaciones en congresos

- ✓ “ANÁLISIS DE LA COMUNIDAD DE ÁCAROS EN CAMPOS DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES”. **Rosana V. Sandler**, Liliana B. Falco, Ricardo Castro Huerta, Carlos E. Coviella. CONEBIOS IV, Cuarto Congreso Nacional de Ecología y Biología del Suelo. Esquel, Chubut, 28 al 30 de Abril de 2015.
- ✓ “CONTRIBUCIÓN DIFERENCIAL DE DISTINTOS GRUPOS DE LA BIOTA EDÁFICA EN LA DESCOMPOSICIÓN DE RESTOS VEGETALES SOBRE SUELOS PAMPEANOS SOMETIDOS A DIFERENTE INTENSIDAD DE USO AGRÍCOLA.” Castro-Huerta R., Falco L., **Sandler R.**, Coviella C. V Reunión Binacional de Ecología y XX Reunión de la Sociedad de Ecología de Chile, Puerto Varas, Chile, 2013.

- ✓ “UTILIZACIÓN DEL MODELO NULO PARA TESTEAR PATRONES DE CO-OCURRENCIA DE LOMBRICES DE TIERRA EN SUELO ARGIUJOL DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES.” Falco, L., **R. Sandler**, L. Saravia, R. Castro-Huerta y C. Coviella. CONEBIOS, III Tercer Congreso Nacional de Ecología y Biología del Suelo. Río Cuarto, 24 al 26 de Abril de 2013.

- ✓ “ACTIVIDAD NITROGENASA, RESPIRACIÓN EDÁFICA Y PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS EN SUELOS PAMPEANOS CON DIFERENTES IMPACTOS PRODUCTIVOS.” Di Ciocco, C., **R. Sandler**, L. Falco, E. Penón y C. Coviella. CONEBIOS, III Tercer Congreso Nacional de Ecología y Biología del Suelo. Río Cuarto, 24 al 26 de Abril de 2013.

- ✓ “ACTIVIDAD Y BIOMASA MICROBIOLÓGICA RELACIONADA A LA DESCOMPOSICIÓN DE LA HOJARASCA EN AGROECOSISTEMAS DE LA PAMPA ONDULADA DE LA PROV. DE BUENOS AIRES”. Castro-Huerta, R.; Falco, L.; **Sandler, R.**; Gimenez, L.; Coviella, C. E. RAE 2012, XXV Reunión Argentina de Ecología. Luján, Buenos Aires, 24 al 28 de Septiembre de 2012. Libro de resúmenes, pág. 136.

- ✓ “DIVERSIDAD DE MESOFAUNA EDÁFICA DE ARTRÓPODOS ASOCIADA A LA HOJARASCA Y SUS VARIACIONES RELACIONADAS AL USO AGRÍCOLA DEL SUELO EN LA PAMPA ONDULADA DE LA PROV. DE BUENOS AIRES, ARGENTINA”. Ricardo A. Castro-Huerta, Liliana B. Falco, **Rosana V. Sandler** y Carlos E. Coviella. XXXIII Congreso Nacional de Entomología y I Congreso Sudamericano de Entomología. La Serena, Chile, 30 de Noviembre, 1 y 2 de Diciembre de 2011.

- ✓ “LA BIOTA EDÁFICA COMO INDICADORA DE PERTURBACIÓN EN SUELOS ARGIUJOLES”. **Sandler, R.**; Falco, L.; Di Ciocco, C.; Castro Huerta, R.; Duhour, A; Coviella, C. REBIOS VIII, Reunión Nacional Científico - Técnica de Biología del Suelo y fijación biológica del nitrógeno. Salta, 6 al 8 de Julio de 2011. Libro de resúmenes: pág. 75.

- ✓ “ACTIVIDAD MICROBIOLÓGICA Y CARBONO DE LA BIOMASA MICROBIANA EN SUELOS SOMETIDOS A DISTINTAS INTENSIDADES DE USO AGRÍCOLA EN LA PROVINCIA DE BS. AS”. Castro-Huerta, R.; **Sandler, R.**; Falco, L. y C. E. Coviella. REBIOS VIII, Reunión Nacional Científico - Técnica de Biología del Suelo y fijación biológica del nitrógeno. Salta, 6 al 8 de Julio de 2011. Libro de resúmenes: pág. 76.

- ✓ “EVALUACIÓN DE RANGOS ÓPTIMOS DE HUMEDAD PARA UN MUESTREO EFICAZ DE LA MESOFAUNA EDÁFICA”. Reposo, G., **Sandler, R.**, Falco, L., Castro Huerta, R., Coviella, C. CONEBIOS, II Segundo Congreso Nacional de Ecología y Biología del Suelo. Mar del Plata, 18 al 20 de Abril de 2011.

- ✓ “VELOCIDAD DE DESCOMPOSICIÓN DE MATERIAL VEGETAL EN SUELOS ARGIUJOLES CON DISTINTA INTENSIDAD DE USO AGRÍCOLA”. Ricardo A. Castro-Huerta, **Rosana V. Sandler**,

Liliana B. Falco y Carlos E. Coviella. CONEBIOS, II Segundo Congreso Nacional de Ecología y Biología del Suelo. Mar del Plata, 18 al 20 de Abril de 2011.

- ✓ “DIVERSIDAD Y ESTRUCTURA TRÓFICA DE LA COMUNIDAD DE MESOFAUNA EDÁFICA DE ARTRÓPODOS PRESENTES EN AGROECOSISTEMAS DEL CENTRO-SUR DE CHILE”. Ricardo A. Castro-Huerta, Enrique A. Mundaca, **Rosana V. Sandler**, Eduardo von Bennowitz y Carlos E. Coviella. CONEBIOS, II Segundo Congreso Nacional de Ecología y Biología del Suelo. Mar del Plata, 18 al 20 de Abril de 2011.
- ✓ “CAMBIOS DE LA BIOTA DEL SUELO EN UN SISTEMA CON 40 AÑOS DE AGRICULTURA CONTINÚA”. **Sandler R.**, Falco L., Di Ciocco C., Castro Huerta R., Coviella C. XII Congreso Nacional y V Internacional de la Ciencia del Suelo. Arequipa, Perú, 11 al 15 de Octubre de 2010. Libro de resúmenes pág. 250-251.
- ✓ “EARTHWORM COMMUNITY RESPONSE TO A DISTURBANCE GRADIENT”. Falco L., Momo F., **Sandler R.**, Coviella C. IX International Symposium of Earthworm Ecology (ISEE9). Xalapa México, 5 al 10 de Septiembre de 2010. Libro de resúmenes pág. 104.
- ✓ “A CONCEPTUAL MODEL TO UNDERSTAND THE ROLE OF EARTHWORMS AS BIOINDICATORS IN THE ARGENTINE PAMPA STEPPE”. Momo F., **Sandler R.**, Falco L. IX International Symposium of Earthworm Ecology (ISEE9). Xalapa México, 5 al 10 de Septiembre de 2010. Libro de resúmenes pag. 86.
- ✓ “EL MANEJO AGRÍCOLA Y SU IMPACTO SOBRE ALGUNAS PROPIEDADES MICROBIOLÓGICAS DE SUELOS ARGIUDOLES”. **Sandler R.**, Falco L., Di Ciocco C., de Luca R. y C. Coviella. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario, Santa Fe, 31 de mayo al 4 de junio de 2010. Resumen expandido. CD-ROM. ISBN 978-987-24771-3-4.
- ✓ “COMPARACIÓN DE LA MESOFAUNA EN SUELOS AGRÍCOLAS Y PASTIZALES NATURALIZADOS”. **Sandler R.**, Falco, L., De Luca, R., Momo, F., Di Ciocco, C., Coviella, Carlos. X Jornadas Pampeanas de Ciencias Naturales. Santa Rosa, La Pampa, 29 y 30 de octubre de 2009. Libro de resúmenes pag. 63.
- ✓ “RÁPIDA RESPUESTA DE LA BIOTA DEL SUELO A CONDICIONES DE ESTRÉS”. De Luca, Romina; **Sandler, R.**, Falco, L., Di Ciocco, C., Penon, E., y Coviella, Carlos E. CONEBIOS, I Primer Congreso Nacional de Ecología y Biología del Suelo. Los Polvorines, Bs. As., del 6 al 8 de mayo de 2009. Libro de resúmenes pag. 23 – 24.