

ACTIVIDADES BIOLÓGICAS Y ESTABILIDAD DE AGREGADOS EN UN SUELO DEL BOSQUE TEMPLADO CHILENO BAJO DOS ETAPAS SUCESIONALES Y CAMBIOS ESTACIONALES

Marysol Alvear, Cecilia Urra, Rodrigo Huaiquilao, Marcia Astorga, Francisco Reyes

Universidad de La Frontera, Casilla 54-D, Temuco, Chile. Correspondencia:
alvear.marysol@gmail.com

Biological activities and aggregates stability in a soil from Chilean temperate forest under two successional stages and seasonal changes

Keywords: Early biological indicators, Chilean forest soils, successional stages.

ABSTRACT

Soil microbial activity is affected by primary ecological variables, such as composition and density of the flora, successional stages and secondary variables, such as climatic seasons. The most important biological activities are those related to the organic matter (MO) and nutrient cycling, which allow us to detect together with some other soil physical parameters, early biochemical changes, soil compaction and biological activities originated by anthropogenic impacts. We quantified and compared a number of biological activities and the percentage of water stable aggregates under two successional stages in two growing seasons in a temperate forest of Central-Southern of Chile. The biological activities evaluated were the fluorescein diacetate hydrolysis (FDA), carbon (MBC) and nitrogen (MBN) microbial biomass and three soil enzymes activities: carboxymethyl-cellulase and β -glucosidase (both associated to carbon cycling) and acid phosphatase (related to the phosphorus cycling). In general, biological activities resulted in significant differences ($p < 0.05$) in the two successional stages. Autumn season showed the higher values for all activities evaluated, except for MBC. In spring, the percentage of water stable aggregates was higher in both successional stages, but without significant differences between them. Our results indicate that the soil biological activities were affected by the moisture content, nutrients and MO level. In order to promote soil environmental conservation, some biological and physical indicators are very important to monitoring soil disturbance in the forest ecosystem.

Palabras clave: Indicadores biológicos tempranos, Suelos bajo bosque nativo, etapas sucesionales.

RESUMEN

La actividad microbiana es afectada por variables ecológicas primarias, tales como la densidad y composición de la flora, etapa sucesional y variables secundarias, como las estaciones del año. Dentro de las actividades biológicas del suelo las más importantes están relacionadas con la materia orgánica (MO) y el ciclado de nutrientes, las que nos permiten detectar, junto a otros parámetros físicos del suelo, cambios tempranos en su bioquímica, grado de compactación de suelos y actividades biológicas producidas por el impacto antrópico. En este estudio cuantificamos y comparamos un número de actividades biológicas y el porcentaje de agregados estables al agua bajo dos etapas sucesionales y dos estaciones de crecimiento en un bosque templado del centro-sur de Chile. Las actividades biológicas evaluadas fueron la hidrólisis de la fluoresceína diacetato (FDA), carbono (CBM) y nitrógeno (NBM) en la biomasa microbiana y la actividad de tres enzimas: carboximetilcelulasa y β -glucosidasa, (ambas involucradas en el ciclo del carbono), y la fosfatasa ácida (involucrada en el ciclo del fósforo). En general, las actividades biológicas evaluadas presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los dos estados sucesionales. En la estación de otoño se registraron los valores más altos para todas las actividades evaluadas, excepto para el CBM. En primavera el porcentaje de agregados estables fue mayor en ambas etapas sucesionales, no existiendo diferencias significativas entre ellas. Nuestros resultados indican que las actividades biológicas del suelo se vieron influenciadas por el contenido de humedad, nutrientes y niveles de MO. De manera de promover la conservación del medioambiente del suelo, algunos indicadores biológicos y físicos son muy importantes para monitorear la perturbación del suelo en ecosistemas forestales.

INTRODUCCIÓN

Los bosques templados del centro-sur de Chile han experimentado grandes cambios en su área de distribución, debido especialmente, en el último siglo, a la acción humana, lo que ha repercutido, principalmente, en las propiedades del suelo, como por ejemplo, en la disminución de la fertilidad y su acidificación (Doran y Zeiss, 2000). Por lo tanto, conocer la dinámica de degradación del material vegetal acumulado en este tipo de ecosistemas, con comunidades vegetales en distintos estados de sucesión, permitiría ganar conocimiento en las áreas boscosas que aún permanecen (Arroyo *et al.*, 1996; Salas, 2001).

Cuando un ecosistema evoluciona, sus comunidades vegetales van siendo reemplazadas por otras más adaptadas a su hábitat (Donoso, 1993). La duración de una determinada sucesión es variable y depende de las condiciones ambientales (Donoso, 1993). También una sucesión vegetal se desarrolla después de una perturbación

(Donoso, 1993). Así la sucesión afecta al suelo donde se desarrolla ya que se producen cambios en las reservas de MO y en el crecimiento de la población microbiana (Alvear *et al.*, 2005; Donoso, 1993). En un ecosistema maduro existe una alta diversidad de estratos arbóreos, arbustivos y herbáceos, intenso reciclaje de nutrientes y una alta diversidad y actividad de microorganismos. Los bosques remanentes del centro-sur de Chile corresponden a una sucesión secundaria ya que se originan en áreas parcialmente alteradas, debido al arrastre de sedimentos, incendios forestales y ramoneo de animales (Donoso, 1993). La actividad microbiana del suelo constituye una medida de importancia ecológica, por una parte representa el nivel de la actividad biológica del componente lábil de la MO del suelo y por otra, integra los factores del medio ambiente y su influencia sobre los ciclos biogeoquímicos misma (Zagal *et al.*, 2002). Los microorganismos

del suelo son un indicador sensible para detectar la degradación de los ecosistemas, su actividad en particular se resiente, incluso, ante cambios o perturbaciones físicas y químicas leves del suelo (Alvear *et al.*, 2007; Alvear *et al.*, 2005).

Hay pocos trabajos que estudian el efecto de la sucesión vegetal sobre las actividades biológicas y físicas del suelo (Saynes *et al.*, 2005; Valenzuela *et al.*, 2001). El reciclaje de nutrientes está fuertemente afectado por la calidad y cantidad de material vegetal que entra al suelo (Matus *et al.*, 2008) y por las características climáticas que también afectan la abundancia microbiana, las especies involucradas y su composición trófica (Wright y Coleman, 2000).

Alvear *et al.* (2007), señaló que las actividades biológicas son excelentes bioindicadores de la calidad del suelo. Dada la gran cantidad de actividades biológicas descritas en la literatura, Nannipieri *et al.* (1995) las clasificó en dos grandes grupos; parámetros generales tales como hidrólisis de la FDA, CBM, NBM, entre otras. Los parámetros específicos son aquellos que incluyen las actividades enzimáticas hidrolíticas extracelulares involucradas en los ciclos biogeoquímicos de los nutrientes del suelo. La hidrólisis de la FDA mide solamente la biomasa microbiana activa que es la que genera esta reacción (Nannipieri *et al.*, 2003). La determinación del C y N biomásico sirve para determinar el tamaño aproximado de la comunidad microbiana presentes en el suelo (Smith *et al.*, 1992). Así las actividades enzimáticas pueden ser usadas como biosensores para detectar los cambios tempranos en la biología y bioquímica del suelo causados, por ejemplo, por factores ambientales. Según Gil Sotres *et al.*, (1992) la medición simultánea de varias enzimas pueden resultar útiles y pueden señalar la fertilidad bioquímica del suelo. Por ejemplo, la carboximetilcelulasa indica el nivel de actividad de las endocelulasas o las enzimas capaces de hidrolizar enlaces glucosídicos al interior de las moléculas cristalinas de celulosa. El producto de su reacción sirve como sustrato para la β -glucosidasa, que está

involucrada en la degradación de la celulosa (Turner *et al.*, 2002). Mientras que la enzima fosfatasa ácida es la encargada de hidrolizar fósforo hasta formas inorgánicas, haciéndolo asimilable por las plantas (Criquet *et al.*, 2004). El porcentaje de agregados estables al agua permite evaluar la calidad del suelo (Alvear *et al.*, 2007; Aravena *et al.*, 2007), y puede definirse como el resultado de la fuerza de unión entre las partículas elementales de los agregados del suelo siendo de gran importancia en la protección contra la pérdida de suelo por erosión (Cerdà, 1998). El objetivo de este estudio fue evaluar, bajo dos etapas sucesionales y estacionales de un bosque templado del centro-sur de Chile, la variación de las actividades biológicas y el porcentaje de agregados estables al agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Corresponde al predio Rucamanque, situado en los 38°39' S y 72°35' O, 376 msnm en la comuna de Temuco, Región de La Araucanía, Chile. El suelo corresponde a un Ultisol, caracterizado por la existencia de cenizas volcánicas antiguas y presencia de arcilla en los horizontes inferiores (Salas, 2001). El clima es templado-húmedo, con una precipitación media anual de 1.400 mm y 12 °C de temperatura. Las lluvias se distribuyen principalmente en invierno, dejando uno o dos meses de sequía en el verano.

Las comunidades vegetales más importantes según Ramírez *et al.* (1989) es la asociación *Nothofago-Perseetum linguae*, parcialmente caducifolia con abundancia de especies leñosas. Según Donoso, (1993), la etapa de fustal corresponde a *Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst. con ejemplares de más de 20 metros de altura y entre 30-50 cm de diámetro a la altura de pecho (DAP) con una edad promedio de 65 años y una cobertura cercana al 78 %. La etapa fustal en Rucamanque corresponde a una superficie de 13,2 hectáreas con poca presencia de epífitas y abundantes lianas.

Esta etapa predomina en la parte alta y en sectores adyacentes a cursos de agua (Salas y García, 2006). La etapa de brinzal corresponde a la regeneración con ejemplares que tienen más de un metro de altura (Donoso, 1993), distribuida hacia la zona ecotonal que marca el límite con la etapa fustal; presenta una superficie aproximada de 2,4 hectáreas. Las especies dominante es *Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst. con una edad promedio de aproximadamente 15 años; los individuos presentan una altura y diámetro promedio de 5 m y 8-10 cm, respectivamente, sin cobertura y ausencia de estratificación.

Recolección de las muestras de suelo

Se recolectaron cinco muestras de suelo en cada etapa sucesional durante la primavera de 2004 y otoño de 2005. Las muestras fueron tomadas a 15 cm de profundidad y luego tamizadas por 2 mm y guardadas 4° C hasta su posterior análisis. Todos los resultados fueron expresados sobre la base de peso seco (105 °C).

El análisis químico de los suelos se realizó según la Norma Chilena descrita por Sadzawka *et al.* (2004). Algunas propiedades se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Análisis de propiedades químicas en un Ultisol de un bosque templado bajo distintas etapas sucesionales y estacionales

Table 1. Chemical analysis in an Ultisol under temperate forest in different successional stages and seasonal changes

	Brinzal		Fustal	
	Primavera	Otoño	Primavera	Otoño
P (mg kg ⁻¹)	3	4	5	5
K (mg kg ⁻¹)	285	429	507	632
pH (H ₂ O)	5,6	5,4	5,8	6,2
MO (%)	9,6	10,5	22,7	20,5
Ca (cmol+/kg)	6,57	7,64	18,81	21,17
Mg (cmol+/kg)	1,85	2,09	4,28	4,31
Na (cmol+/kg)	0,13	0,12	0,18	0,21
K (cmol+/kg)	0,73	1,10	1,30	1,62
Al (cmol+/kg)	0,12	0,10	0,01	0,01
Saturación Al (%)	1,28	0,90	0,04	0,04
CICE (cmol+/kg)	9,40	11,05	24,58	27,32
S. Bases (cmol+/kg)	9,28	10,95	24,57	27,21
Humedad (%)	27,2	24,4	35,2	31,0

Diseño experimental

El diseño fue un factorial de dos sucesiones por dos estaciones. Se realizó un muestreo aleatorio dirigido, donde se extrajeron cinco muestras de suelo por etapa sucesional. Se evaluó el efecto de ambos factores sobre la hidrólisis de la FDA, CBM, NBM, las actividades β -glucosidasa, fosfatasa ácida, carboximetilcelulasa y el porcentaje de agregados. Todas las determinaciones se hicieron en triplicado.

Actividad microbiana

Hidrólisis de la FDA

Se realizó según la metodología descrita por Alvear *et al.* (2007). Se incubaron 1,5 g de suelo a 25° C durante 60 min. Luego de filtrar se midió en el espectrofotómetro a 490 nm. Los resultados se expresaron como μg fluoresceína g^{-1} , ya que éste compuesto químico se genera por hidrólisis de lipasas y esterases provenientes de los microorganismos vivos (Schnürer & Roswall, 1982).

Carbono y nitrógeno biomásico

Se midió según el procedimiento de fumigación-extracción de Vance *et al.* (1987). El flujo de nitrógeno asociado a la biomasa se determinó de forma general a partir del nitrógeno reactivo a ninhidrina, siguiendo la técnica colorimétrica de Joergensen y Brookes (1990). Se leyó a una absorbancia de 570 nm.

Actividades enzimáticas

Actividad carboximetilcelulasa

Se utilizó el método de Schinner y von Mersi (1990), empleando carboximetilcelulosa como sustrato. La

actividad de la carboximetilcelulasa se expresó en μmoles de glucosa $\text{g}^{-1}\text{suelo}$.

Actividad β -glucosidasa

Se evaluó según Alvear *et al.* (2007). Un g de suelo se hizo reaccionar con p-nitrofenil- β -glucopiranosido, para medir espectrofotométricamente El p-nitrofenol (PNF) liberado en la reacción a 400 nm. La actividad de la enzima se expresó en μmoles PNF $\text{g}^{-1} \text{h}^{-1}$.

Actividad fosfatasa ácida

Para esta evaluación se procedió de acuerdo al método descrito por Alvear *et al.* (2007), utilizando como sustrato de la reacción p-nitrofenilfosfato, el cual se determinó espectrofotométricamente a 400 nm. La actividad de la enzima se expresó como μfmoles de p-nitrofenilfosfato $\text{g}^{-1} \text{h}^{-1}$.

Porcentaje de agregados estables al agua

Se utilizó la técnica descrita por Borie *et al.* (2000). Se pesaron cuatro g para cada muestra de suelo, previamente tamizada por 2 mm y se depositó sobre otro tamiz con abertura de malla 0.25 mm. Luego, se asperjó agua destilada sobre el suelo y se dejó reposar por 20 minutos. Posteriormente, el tamiz se sumergió en un recipiente con agua destilada y se agitó a 37 oscilaciones por minuto, por siete minutos. Las partículas de suelo que permanecieron sobre el tamiz correspondieron a los agregados estables. Tanto los agregados que decantaron bajo el tamiz como aquellos agregados estables se secaron por 24 horas a 105° C. El porcentaje de agregados estables se determinó según Kamper y Rossenau (1986). El suelo estudiado en ambas etapas sucesionales, presentó una cantidad de arena despreciable (datos no mostrados), por lo que no fue necesario considerarla en las ecuación.

Análisis Estadístico

Todas las actividades biológicas evaluadas cumplieron con el parámetro estadístico de normalidad. Para establecer los efectos, el CBM, NBM, hidrólisis de la FDA y %AEA, fueron sometidos a un análisis de varianza (ANDEVA) y la prueba de comparación múltiple de medias de Scheffé. Para los parámetros restantes la comparación se realizó a través de la prueba t con un nivel de significancia de 5 %.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Hidrólisis de la fluoresceína diacetato y biomasa microbiana

En primavera, el fustal presentó niveles de hidrólisis de la FDA significativamente superiores ($p < 0,01$) a los del brinzal, situación que se repitió en otoño ($p < 0,01$). Al comparar las distintas estaciones de muestreo (primavera y otoño) el fustal no presentó diferencias significativas, no así el brinzal que mostró leves diferencias ($p = 0,026$). La biomasa microbiana de C fluctuó entre 1.392 y 1.694 mg C kg⁻¹ para el brinzal y entre 1.844 y 3.099 mg C kg⁻¹ en el fustal ($p = 0,002$), (Cuadro 2). En general la biomasa de C fue dos veces superior en el fustal lo que concuerda con la mayor actividad de FDA. La biomasa microbiana de C en ambas estaciones en el brinzal fue similar pero significativamente mayor en el fustal en el muestreo de otoño ($p = 0,002$). Hubo una estrecha y positiva correlación entre la FDA y la CBM con un R² de 0.62 (no mostrado). Del mismo modo la biomasa nitrogenada varió entre 70 y 86 mg N kg⁻¹ y fue entre tres a cuatro veces superior a del fustal. También hubo una correlación positiva entre la actividad FDA y la N-BM, con un R² 0.88. Estos resultados son explicados por el aporte del material vegetal del sotobosque y del estrato arbóreo,

favoreciendo una mayor fuente de nutrientes, lo que mejora las condiciones para el desarrollo y proliferación de la biomasa microbiana, especialmente de aquella que se ubica en los horizontes superficiales (Jones, 1998). No obstante las diferencias entre estaciones probablemente se deberían a la disponibilidad de C y las condiciones de humedad y temperatura del sitio (Alvear *et al.*, 2007; Bardgett *et al.*, 2005; Nsabimana *et al.*, 2004). En la etapa de fustal el contenido de C y N biomásico es mayor, ya que las plantas requieren un flujo constante de nutrientes, tanto de compuestos nitrogenados como carbonados, acorde a su edad fisiológica. Además, existe una dinámica ecológica más compleja, por la biodiversidad de especies vegetales; siendo el contenido de N orgánico en la hojarasca proveniente del fustal más elevado que el encontrado en la hojarasca asociada al brinzal, donde aún predominan pastizales (datos no mostrados). Tanto Smith y Paul (1990), como Hart y Firestone (1991), señalan que el NBM es controlado por el contenido de humedad del suelo. En este estudio los niveles de humedad en ambos sitios son similares (Cuadro 1) lo que sugiere que no sería un factor determinante.

Actividades enzimáticas hidrolíticas relacionadas con ciclos biogeoquímicos

Tanto en primavera como en otoño la actividad de la enzima de carboximetilcelulasa (CMC) fue significativamente superior en el fustal ($p = 0,001$). En el brinzal como en el fustal, los niveles de ésta fueron significativamente mayores en otoño ($p < 0,001$). La actividad β -glucosidasa, tanto en primavera como en otoño, fue significativamente superior en el fustal ($p = 0,007$). La fosfatasa ácida en ambas estaciones fue significativamente mayor en el fustal ($p = 0$). (Cuadro 3).

Cuadro 2. Biomasa microbiana en un Ultisol de un bosque templado bajodistintas etapas sucesionales y estacionales**Table 2.** Microbial biomass in an Ultisol under temperate forest in different successional stages and seasonal changes

N° de muestra	Brinzal		Fustal	
	Otoño	Primavera	Otoño	Primavera
<i>FDA µg de Fluoresceína (g⁻¹)</i>				
1	54.1 ± 4.5	60.2 ± 4.6	93.3 ± 9.8	99.7 ± 0.2
2	51.8 ± 4.5	60 ± 0.2	86.6 ± 6.5	98.5 ± 1.1
3	45.3 ± 1.8	64.8 ± 0.9	84.6 ± 2.1	99.5 ± 0.2
4	56.9 ± 3.7	65.7 ± 5.7	92.1 ± 12.2	94.3 ± 4.1
5	51.1 ± 5.8	60.2 ± 4.6	104.1 ± 1.2	97.5 ± 2.3
<i>CBM mg C kg⁻¹</i>				
1	1392.4 ± 203.9	1406.9 ± 5.3	1880 ± 12.4	2962.1 ± 136
2	1394.2 ± 102.2	1431.8 ± 10.7	1856.2 ± 36.2	2966.1 ± 13
3	1543.3 ± 70.2	1421.1 ± 13.6	1868.3 ± 12.9	2964.1 ± 3.5
4	1467.8 ± 224.9	1419.3 ± 11.5	1892.4 ± 12.2	2963.1 ± 115
5	1694.1 ± 50.2	1414 ± 9.7	1844.1 ± 24.2	3099 ± 16
<i>NBM mg N kg⁻¹</i>				
1	78.5 ± 4.5	70.2 ± 6.9	268.1 ± 18	238.5 ± 4.4
2	86.2 ± 6.9	77.3 ± 5.8	262 ± 6.9	240.2 ± 11.2
3	70.9 ± 7.8	70.2 ± 1	255.8 ± 13.2	234.9 ± 5.7
4	86 ± 0.2	71.2 ± 0.9	268 ± 15.6	238.5 ± 12.4
5	78.1 ± 8.1	70.3 ± 0.1	286.1 ± 4.9	251.1 ± 6.1

Valores corresponden a la media de cada muestra con tres repeticiones con su respectiva desviación estándar

Cuadro 3. Actividades enzimáticas en un Ultisol de un bosque templado bajo distintas etapas sucesionales y estacionales**Table 3.** Enzyme activities in an Ultisol under temperate forest in different successional stages and seasonal changes

Nº de muestra	Brinzal		Fustal	
	Otoño	Primavera	Otoño	Primavera
<i>β-glucosidasa (μmoles PNF g⁻¹)</i>				
1	0.76 ± 0.02	1.08 ± 0.1	1.46 ± 0.51	2.68 ± 0.08
2	0.78 ± 0.03	1.3 ± 0.1	1.9 ± 0.07	2.61 ± 0.24
3	0.73 ± 0.05	1.16 ± 0.2	1.13 ± 0.7	2.45 ± 0.32
4	0.81 ± 0.03	1.11 ± 0.2	1.97 ± 0.5	2.09 ± 0.6
5	0.78 ± 0.02	1.34 ± 0.05	1.42 ± 0.06	2.09 ± 0.51
<i>Carboximetilcelulasa (μg glucosa g⁻¹)</i>				
1	0.83 ± 0.02	1.71 ± 0.35	1.03 ± 0.1	2.66 ± 0.42
2	0.81 ± 0.03	1.45 ± 0.31	1.23 ± 0.03	2.24 ± 0.12
3	0.84 ± 0.02	1.86 ± 0.16	1.26 ± 0.13	2.36 ± 0.69
4	0.86 ± 0.01	1.58 ± 0.1	1.13 ± 0.12	2.95 ± 0.02
5	0.87 ± 0.01	1.48 ± 0.03	1.25 ± 0.02	2.12 ± 0.1
<i>Fosfatasa ácida (μmoles PNF g⁻¹)</i>				
1	282.0 ± 10.5	39.4 ± 0.6	463.3 ± 51	57.3 ± 6.7
2	292.5 ± 4.1	40.0 ± 3.2	460.8 ± 3.5	57.4 ± 8.4
3	290.0 ± 8.0	38.4 ± 2.4	407.7 ± 5.7	63.9 ± 0.1
4	294.9 ± 12.1	43.2 ± 3.9	479.0 ± 73.3	57.6 ± 2.2
5	303.2 ± 9.7	36.00 ± 1	484.3 ± 24.4	55.6 ± 2.4

Valores corresponden a la media de cada muestra con tres repeticiones con su respectiva desviación estándar

Se piensa que debido al origen y composición cualitativa y cuantitativa, de la materia orgánica del suelo, existirían cambios en la estructura de la comunidad de los hongos celulolíticos y de los microorganismos lo que sería reflejado indirectamente en nuestros resultados. El contenido de MO y la humedad del suelo en la etapa fustal comparado con el menor aporte de hojarasca en la etapa brinzal estarían influyendo en la actividad biológica en general. Downer *et al.* (2001) sostienen que los sustratos orgánicos provenientes de la MO y el suelo mineral son capaces de generar una amplia diversidad de hongos y bacterias que usan la celulosa como fuente carbonada, lo cual aumenta el nivel de actividad de las enzimas que se encuentran tanto en el suelo como en el material vegetal degradado. A su vez, Deng y Tabatabai (1996) y Wittmanna *et al.* (2004), señalan que las actividades enzimáticas aumenta con el incremento de MO fresca y por el contenido de C del suelo, por medio del exudado de oligosacáridos y otros compuestos orgánicos provenientes de la degradación de la hojarasca. Algunas enzimas, dada la naturaleza del material, presentan un sinergismo, tal es el caso de la β -glucosidasa con respecto a la CMC-asa (Cuadro 3). Se observa que los ambos niveles puede ser explicados ya que a medida que la CMC-asa va degradando los compuestos celulósicos se libera celobiosa, que constituye el sustrato principal para dicha enzima. Sin embargo, los niveles de β -glucosidasa obtenidos en primavera son bastante menores a los obtenidos por otros estudios, probablemente debido al sustrato recalcitrante (Alvear *et al.*, 2007; Alvear *et al.*, 2005; Campbell *et al.*, 1997),

Según Rivas *et al.* (2007), Criquet *et al.* (2004), y Schneider *et al.* (2001), la humedad es una de las variables involucradas en la regulación de las actividades enzimáticas afectando considerablemente su producción. Esto explicaría la mayor actividad enzimática en primavera. En otoño, los niveles de humedad del suelo disminuyeron

significativamente, tanto en la etapa de fustal como de brinzal, disminuyendo las actividades enzimáticas (Cuadro 1 y 3). La disponibilidad de algunos nutrientes (Cuadro 1), puede tener directa incidencia sobre las actividades biológicas y enzimáticas. Por ejemplo, la enzima fosfatasa ácida disminuyó significativamente en otoño asociado a la disponibilidad de P (Perrot *et al.*, 1990).

En la etapa de fustal, una mayor tasa de mineralización del P orgánico, con respecto a la etapa de brinzal, explicaría las diferencias en la actividad fosfatasa ácida, entre ambas estaciones.

Yadav y Tarafdar (2004), señalan que la edad fisiológica de los árboles tiene directa incidencia en la actividad de las enzimas, especialmente la fosfatasa ácida. En concordancia, los mayores niveles de actividad enzimática se observaron en la etapa de fustal en otoño, a excepción de la enzima fosfatasa ácida. En el brinzal, en cambio, la mayor actividad en esta misma época, se relaciona con la etapa de desarrollo de las plantas.

Agregados estables al agua

El porcentaje de agregados estables al agua fue similar en otoño, en ambas etapas sucesionales 97 ± 1.4 para brinzal y 98 ± 1.1 para fustal, pero con un significativo descenso en primavera 75 ± 2.5 y 81 ± 2.6 , respectivamente. Esto concuerda con los resultados encontrados por Hillel (1982), quien señala que la agregación del suelo puede variar en las estaciones del año. Esto se explica por varios factores entre ellos por la proliferación de hongos dada la condición de pH (Anderson y Domsh, 1980). Los hongos y sus hifas pueden ligar partículas de suelo y forzar su contacto con otros agentes cementantes. Los hongos son capaces de desarrollar interacciones benéficas con las plantas, como por ejemplo la asociación micorrízica las que secretan sustancias que mantienen la cohesión de las partículas (Guadarrama *et al.*, 2004). Esto

también ha sido descrito para la glomalina, una glicoproteína que contribuye a la unión de partículas y a la formación de los agregados estables (Millar y Jastrow, 1992; Wright y Upadhyaya, 1998, Borie *et al.*, 2000). En primavera, el claro descenso en el nivel de agregación se debería, en parte, a la tasa de degradación de la MO (Gavande, 1986) y el aumento en otoño, al descenso en la actividad global de los microorganismos del suelo (Primavesi, 1984; Gavande, 1986). Por tanto, la acción microbiana puede ser transitoria, ya que tanto las sustancias cementantes como los micelios envolventes, pueden ser atacados por la biomasa microbiana.

CONCLUSIONES

La mayoría de las actividades biológicas fueron influenciadas por las etapas sucesionales evaluadas, siendo significativamente mayores ($p < 0,05$) en la etapa de fustal (árboles maduros) que en la brinzal (árboles jóvenes). En relación a la estacionalidad, los niveles de actividades biológicas fueron significativamente mayores en otoño ($p < 0,05$), a excepción de la biomasa microbiana de N. En primavera, ambas etapas sucesionales presentaron un nivel de agregación similar, no existiendo diferencias significativas ($p < 0,05$); en otoño, el %AEA desciende significativamente en ambas etapas, siendo menor en fustal, debido seguramente a cambios en la población y actividad microbiana. Las actividades biológicas resultan ser indicadores tempranos de los cambios provocados en la calidad y nivel nutricional de los suelos forestales de la Región por efecto tanto de las condiciones medioambientales como de la intervención antrópica.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el financiamiento otorgado por el Proyecto

DIDUFRO N° 120316. Además, agradecemos muy especialmente al Dr. Francisco Matus, Editor Asociado de esta Revista y Académico del Departamento de Ciencias Químicas de la Universidad de La Frontera por los numerosos comentarios tanto de redacción como de contenido en la versión original de este manuscrito.

BIBLIOGRAFÍA

- ALVEAR, M., REYES, F., MORALES, A., ARRIAGADA, C., REYES, M., 2007. Actividad biológica y agregados estables al agua en dos tipos de formaciones vegetales de un bosque templado del Centro-Sur de Chile con perturbación antrópica. *Ecología Austral*. 17: 113- 122.
- ALVEAR, M., ROSAS, A., ROUANET, J.L., y BORIE, F., 2005. Effects of three soil tillage systems on some biological activities in an Ultisol from southern Chile. *Soil and Tillage Research*. 82: 195-202.
- ANDERSON, J.P., DOMSCH, K.H., 1980. Quantities of plant nutrients on the microbial biomass of selected soils. *Soil Science*. 130: 211-216.
- ARAVENA, C., DIEZ, M.C., GALLARDO, F.; MORA, M.L., VALENTÍN, C., 2007. Utilización de lodo de la industria de celulosa y su efecto sobre las propiedades físico-químicas en suelos volcánicos degradados. *Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*. 7(1):1-14.
- ARROYO, M.T.K., CAVIERES, L., PEÑALOZA, A., RIVEROS, M. FAGGI, A., 1996. Relaciones fitogeográficas y patrones regionales de riqueza de especies en la flora del bosque lluvioso templado de Sudamérica, en *Ecología de los bosques nativos de Chile*. J. Armesto, C. Villagrán, M.K. Arroyo, eds. Editorial Universitaria. Santiago, Chile. pp. 71-99.

- BARDGETT R.D., BOWMAN W.D., KAUFMANN R., SCHMIDT S.K. 2005. A temporal approach to linking aboveground and belowground ecology. *Ecology and Evolution*. 20: 634-641.
- BORIE, F., RUBIO, R., MORALES, A., CASTILLO, C. 2000. Relación entre la densidad de hifas de hongos micorrizógenos arbusculares y producción de glomalina con las características físicas y químicas de suelos bajo cero labranza. *Revista Chilena de Historia Natural* 73:749-756.
- CAMPBELL, C.D., GRAYSTON, S.J., HIRST, D.J. 1997. Use of rhizosphere carbon sources in sole carbon source tests to discriminate soil microbial communities. *Journal of Microbiological Methods*. 30: 33-41.
- CERDÀ, A., 1998. Soil aggregate stability under different Mediterranean vegetation types. *Catena*. 32: 73-86.
- CRIQUET, S., FARNET, A.M., FERRE, E., LE PETIT, J. 2004. Annual dynamics of phosphatase activities in an evergreen oak litter: influence of biotic and abiotic factors. *Soil Biology and Biochemistry*. 36: 1111-1118.
- DENG, S.P., TABATABAI, M.A. 1996. Effect of tillage and residue management on enzyme activities in soils. II Glycosidases. *Biology and Fertility of Soils*. 22: 208-213.
- DONOSO, C., 1993. Bosques templados de Chile y Argentina. Ed Universitaria. Santiago, Chile. 484 p.
- DORAN J W, ZEISS M 2000 Soil health sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*. 15:3-11.
- DOWNER, A.J., MENGE, J.A., POND, E. 2001. Association of cellulytic enzyme activities in eucalyptus mulches with biological control of *Phytophthora cinnamomi*. *Phytopathology*. 91: 847-855.
- GAVANDE, S.A. 1986. Física de suelos. Principios y aplicaciones. Mexico ed. Limusa, S.A. de C.V. 351 p
- GIL-SOTRES, F., TRASAR-CEPEDA, C., CIARDI, C., CECCANTI, B., 1992. Biochemical characterization of biological activity in very young mine soils. *Biology and Fertility of Soils*. 13: 25-30.
- GUADARRAMA P., SÁNCHEZ-GALLÉN I., ÁLVAREZ-SÁNCHEZ J., RAMOS-ZAPATA J. 2004. Hongos y plantas, beneficios a diferentes escalas en micorrizas arbusculares. *Ciencias* 73:38-45.
- HART, S.C., FIRESTONE, M.K. 1991. Forest floor-mineral soil interactions in the internal nitrogen cycle of an old-growth forest. *Biogeochemistry*. 12: 103-127.
- HILLEL, D. 1982. Introduction to soil physics. San Diego (U.S.A.), Academic Press, 364 p.
- JOERGENSEN, R., BROOKES, P. 1990. Ninhydrin-reactive measurements of microbial biomass in 0,5 M K₂SO₄ soil extracts. *Soil Biology and Biochemistry*. 22: 1023-1028.
- JONES, D. 1998. Organics acids in the rhizosphere a critical review. *Plant and Soil*. 205: 25-44.
- KAMPER, W.D., ROSSENAU, R.C. 1986. Aggregate stability and size distribution. *Methods of Soil Analysis, part I. Physical and Mineralogical Methods-Agronomy Monograph N° 9* (2nd edition). 427-442 pp.
- MATUS, F., LUSK, C., MAIRE, C. 2008. Effects of soil texture, C input rates and litter quality on free organic matter and N mineralization in Chilean rain forest and agricultural soils. *Comm. Plant and Soil Analysis. In press*.
- MILLER, R.M., JASTROW, J.D. 1992. The role of Mycorrhizal fungi in soil conservation. En: Bethlenfalvay GJ, Linderman RG (eds) *Mycorrhizae in Sustainable Agriculture*. 124 pp.

- NANNIPIERI, P., LANZI, L., BADALUCCO. 1995. La capacidad metabólica a la calidad del suelo. *Agronomía*. 29:312-316.
- NANNIPIERI, P., ASCHNER, J., CECCHERINI, M., LANDI, L., PIETRAMELLARA, G., RENELLA, G. 2003. Microbial diversity and soil functions. *European Journal of Soil Science*. 54: 655-670.
- NSABIMANA, D., HAYNES, R.J., WALLIS, F.M. 2004. Size, activity and catabolic diversity of the soil microbial biomass as affected by land use. *Applied Soil Ecology*. 26: 81-92.
- PERROT, K.W., SARATHCHANDRA, S.U., WALLER, J.E. 1990. Seasonal storage and release of phosphorus and potassium by organic matter and the microbial biomass in a high-producing pastoral soil. *Australian Journal Soil Research*. 28: 593-608.
- PRIMAVESI, A. 1984. Manejo ecológico del suelo. 6a. ed., Ateneo, Buenos Aires, Argentina.
- RAMÍREZ, C., SAN MARTÍN, J., HAUSENSTEIN, E., CONTRERAS, D. 1989. Estudio fitosociológico de la vegetación de Rucamanque. *Cautín, Chile. Studia Botánica*. 8: 91-115.
- RIVAS, Y., GODOY, R., VALENZUELA, E., LEIVA, J., OYARZÚN, C., ALVEAR, M. 2007. Actividad Biológica del suelo en dos bosques de *Nothofagus* del centro sur de Chile. *Gayana Botánica*. 64: 81-92.
- SADZAWKA, A., CARRASCO, M., GREZ, R., MORA, M. 2004. Métodos de análisis recomendados para los suelos y lodos chilenos. Sociedad Chilena de Ciencia del Suelo.
- SALAS, C. 2001. Caracterización básica del relicto de biodiversidad Rucamanque. *Bosque Nativo*. 29: 3-9.
- SALAS, C., GARCÍA O. 2006. Modelling height development of mature *Nothofagus obliqua*. *Forest Ecology and Management*. 229:1-6.
- SAYNES, V., HIDALGO, C., ETCHEVERES, J., CAMPO, J.E. 2005. Soil C and N dynamics in primary and secondary seasonally dry tropical forests in Mexico. *Applied Soil Ecology*. 29: 282-289.
- SCHINNER, F., VON MERSI, W. 1990. Xylanase, CM-cellulase and invertase activity in soil: an improved method. *Soil Biology and Biochemistry*. 22: 511-515.
- SCHNEIDER, K., TURRION, M-B., GRIERSON, P., GALLARDO, J. 2001. Phosphatase activity, microbial phosphorus, and fine root growth in forest soils in the Sierra de Gata, western central Spain. *Biology and Fertility of Soils*. 34: 151-155.
- SCHNÜRER J., ROSSWALL T. 1982. Fluorescein hydrolisis as a measure of total microbial activity in soil and litter. *Appl. Env. Microbiol.*, 43: 1256-1261.
- SMITH, J.L., PAUL, E.A. 1990. The significance of soil microbial biomass estimations. *Soil Biochemistry*. 6: 357-396.
- SMITH, J., PAPENDICK, R., BEZDECEZ, D., LYNCH, J. 1992. Soil Organic matter dynamics and crop residue management. En: Meeting, B. (editor) *Soil Microbial Ecology*. Marcel Dekker, New York, United States. Pp 65-94.

- TURNER, B., HOPKINS, D., HAYGARTH, P., OESTLE, N. 2002. β -Glucosidase activity in pasture soils. *Applied Soil Ecology*. 20: 157- 162.
- VALENZUELA, E., LEIVA, S., GODOY, R. 2001. Variación estacional y potencial enzimático de microhongos asociados con la descomposición de hojarasca de *Nothofagus pumilio*. *Revista chilena de historia natural*. 74: 737-749.
- VANCE, F., BROOKES, P., JENKINSON, D. 1987. Microbial biomass measurements in forest soils: The use of the chloroform fumigation-incubation method in strongly acid soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 19: 697-702.
- WITTMANNA, C., KÄHKÖNEN, M., ILVESNIEMIB, H., KUROLAA, J., SALKINOJA-SALONENA, M. 2004. Areal activities and stratification of hydrolytic enzymes involved in the biochemical cycles of carbon, nitrogen, sulphur and phosphorus in podsolized boreal forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 36: 425-433.
- WRIGHT, C.J., COLEMAN, D.C. 2000. Cross-site comparasion of soil microbial biomass, soil nutrient status, and nematode trophic groups. *Pedobiología*. 44: 2-23.
- WRIGHT, S., UPADHYAYA. 1998. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil*. 198: 97-107.
- YADAV, B.K., TARAFDAR, J.C. 2004. Phytase activity in the rhizosphere of crops, trees and grasses under arid environment. *Journal of Arid Environment*. 58: 285-293.
- ZAGAL, E., RODRÍGUEZ, N., VIDAL, I., QUEZADA, L. 2002. Microbial activity in a volcanic ash soil under different agricultural management. *Agricultura Técnica* 62: 297-309.