



Influencia del glifosato y la fertilización nitrogenada en la biomasa y respiración microbiana de un suelo altoandino del Perú

Influence of glyphosate and nitrogen fertilization on microbial biomass and respiration in a Peruvian high Andean soil

Rivas, Fredy F.¹; Yañac, Carlos E.¹; Lizana, Giuliana S.¹

¹Facultad de Agronomía, Universidad Nacional del Centro del Perú

Cómo referenciar:

Rivas, F. F.; Yañac, C. E.; Lizana, G. S. (2020). Influencia del glifosato y la fertilización nitrogenada en la biomasa y respiración microbiana de un suelo altoandino del Perú. *Prospectiva Universitaria Ciencias Agrarias*, 1(1), 1-13.

Resumen

Se determinó el efecto del glifosato y la fertilización nitrogenada en la biomasa y respiración microbiana de un suelo alto andino del Perú, se llevó a cabo un experimento utilizando un suelo proveniente de la localidad de Pasos, Huancayo, Junín. Se Diseñó un experimento completamente al azar en arreglo factorial 5x4 con 5 dosis de glifosato (0, 4, 8, 16 y 32 litros i.a./Ha) y 4 niveles de fertilización nitrogenada (0, 250, 500 y 1000 mg N/kg de suelo), con 3 repeticiones. Las dosis de N adicionado al suelo altoandino ocasionaron incrementos en el carbono de la biomasa microbiana (CBM) y la respiración basal del suelo (RBS), el incremento del CBM fueron mayores cuando se hicieron aplicaciones de glifosato, en tanto que el incremento en las dosis de N adicionado al suelo, ocasionó descensos en el cociente metabólico (qCO_2) y aumentos en el cociente microbiano ($qMIC$). Por otro lado, con el incremento en las dosis de glifosato, generaron aumentos en el CBM, así como en la RBS; mientras que las adiciones de glifosato al suelo altoandino, ocasionaron descensos en el qCO_2 e incrementos en el $qMIC$.

Palabras clave: glifosato, nitrógeno, CBM, RBS.

Abstract

The effect of glyphosate and nitrogen fertilization on the biomass and microbial respiration of a Peruvian high Andean soil was determined using a soil from the locality of Pasos, Huancayo, Junín. A completely randomized experiment was designed in a 5x4 factorial arrangement with 5 doses of glyphosate (0, 4, 8, 16 and 32 liters i.a./Ha) and 4 levels of nitrogen fertilization (0, 250, 500 and 1000 mg N/kg of soil), with 3 replications. The doses of N added to the high Andean soil caused increases in microbial biomass carbon (MBC) and basal soil respiration (BSR), the increases in MBC were greater when glyphosate was applied, while the increase in the doses of N added to the soil caused decreases in the metabolic quotient (qCO_2) and increases in the microbial quotient ($qMIC$). On the other hand, with the increase in glyphosate doses, they generated increases in the MBC as well as in the BSR; while the additions of glyphosate to the high Andean soil caused decreases in the qCO_2 and increases in the $qMIC$.

Keywords: glyphosate, nitrogen, CBM, RBS.

1 Introducción

La producción y sustentabilidad de los ecosistemas dependen de la calidad de los suelos agrícolas, la misma que funciona como un sistema resiliente y variado y debe sostener una productividad primaria y secundaria, protegiendo la calidad del medioambiente; este es una definición que compromete a las diversas propiedades del suelo (Harris & Bezdicek, 2015). La descomposición de la materia orgánica (MO) se debe la actividad microbiana del suelo, de ahí que las actividades microbiológicas del suelo son importantes para comprender los cambios que se suscitan en ella (Abril, 2003), como la aplicación de fertilizantes y otras prácticas de manejo como la aplicación de pesticidas.

Arshad y Martin (2002) sostienen que los parámetros biológicos en períodos de tiempo muy cortos, son muy sensibles al cambio de las prácticas de manejo de suelos, más que las variaciones en el contenido de MO de un suelo, ya que esta varía muy lentamente y solo se puede detectar las variaciones a largo plazo.

Las propiedades biológicas y bioquímicas del suelo como: biomasa microbiana, carbono y nitrógeno microbiano, tasa de respiración y el cociente metabólico son indicadores muy sensibles que podrían ser utilizados en el monitoreo de las alteraciones ambientales que ocurren en los suelos de uso agrícola, de uso forestal y otros, estos indicadores se constituyen en herramientas para orientar la planificación y la evaluación de las prácticas de manejo de suelos utilizadas. Los suelos altoandinos del valle del Mantaro, con elevados contenidos de MO, son sometidos a la producción de papas, aun cuando las dosis de fertilización nitrogenada no son muy significativas, casi está exento de la aplicación del glifosato.

El roundup que tiene como ingrediente activo al glifosato, es un herbicida de espectro muy amplio, es no selectivo, post emergente y de amplio uso en la agricultura. La necesidad de utilizar este herbicida es con la finalidad de eliminar algunas hierbas no objeto del cultivo, que perturban y restringen la producción de los cultivos. En el valle del Mantaro, este herbicida es utilizado en la agricultura con la denominación de Roundup, de ahí que se hace necesario su estudio en los giros metabólicos que ocasiona en los microorganismos del suelo y lo que es muy importante

es que año a año las dosis de este herbicida se ven acrecentadas en su aplicación. Los suelos de la región central del país, presentan bajas disponibilidades de nitrógeno, de ahí que los agricultores ven la necesidad de aplicar fertilizantes nitrogenados solubles, con el objetivo de incrementar la producción de los cultivos; definitivamente la fertilización nitrogenada es otro de los factores que afectan la calidad de los suelos que deben ser estudiados a través de indicadores microbiológicos del suelo altoandino.

La biomasa microbiana del suelo está definida como el componente microbiano vivo del suelo que está constituido por bacterias, hongos, microfauna y algas, y es la responsable de la mineralización de los residuos orgánicos, del ciclaje de los nutrientes y del flujo de energía que ocurre en el suelo (Jenkinson & Ladd, 1981). La respiración basal del suelo consiste en evaluar la producción de CO_2 resultante de la actividad metabólica microbiana, de las raíces vivas de las plantas y de los macroorganismos como los gusanos, nematodos, insectos y otros (Tótolá & Chaer, 2002). Los objetivos propuestos fueron: Caracterizar la naturaleza del suelo altoandino del Perú proveniente de la región central del país y determinar el efecto del glifosato y la fertilización nitrogenada en la biomasa y respiración microbiana de un suelo altoandino del Perú.

2 Materiales y Métodos

2.1 Procedimiento

El estudio se desarrolló en el Laboratorio de Microbiología de suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional del Centro del Perú (UNCP). Las características de la ubicación geográfica son: Altitud 3316 msnm, Latitud sur 11° 46' 48", Longitud oeste 75° 20' 13", ubicado en el distrito de El Mantaro, provincia de Jauja, departamento de Junín.

Se diseñó un experimento en arreglo factorial 5x4, compuesto por cinco dosis de glifosato (0, 4, 8, 16 y 32 litros i.a./ha) y cuatro niveles de fertilización nitrogenada (0, 250, 500 y 1000 mg N/kg de suelo), con tres repeticiones, haciendo un total de 60 unidades experimentales.

2.2 Muestra

Para la aplicación de los tratamientos se seleccionó un suelo altoandino proveniente de Pasos, distrito de Pucará, Provincia de Huancayo, departamento de Junín; la misma que fue muestreada de manera compuesta a 20 cm de profundidad, secado al aire libre y pasado por un tamiz de 2.0 mm de diámetro.

El suelo presentó valores altos de humedad actual, así como también de la capacidad de campo, debido fundamentalmente del alto contenido de materia orgánica (5,057%), su pH ácido conlleva a problemas de deficiencias nutricionales: fósforo, azufre, molibdeno y otros. Luego del muestreo del suelo, este fue pasado por tamiz de 2 mm de diámetro, una cantidad de suelo fue almacenado a una temperatura de 4 °C, y otra cantidad de muestra se llevó al laboratorio para realizar los análisis físicos y químicos. Los tratamientos con el herbicida glifosato correspondieron a: 0, 1, 2, 4 y 8 veces la dosis recomendada equivalente a 4 g i.a/L, en tanto que la fuente nitrogenada fue el fertilizante NO_3NH_4 . La evolución de C-CO_2 fue analizada a intervalos de 3 días; después de un periodo de 30 días de incubación, aproximadamente a 15°C, las unidades experimentales fueron sometidas al análisis, determinándose las siguientes características edáficas:

- Carbono de la biomasa microbiana (Vance et al., 1987).
- Respiración basal del suelo (Jenkinson & Powlson, 1976).
- Cociente metabólico microbiano (Anderson & Domsch, 1993).
- Cociente microbiano.
- Carbono orgánico del suelo (Walkley & Black, 1934).

2.3 Análisis de datos

Se aplicaron Modelos de regresión y pruebas ANOVA para analizar diferencias significativas de C microbiano, emisión de CO_2 , cociente metabólico microbiano y el cociente microbiano del suelo.

3 Resultados

3.1 Caracterización edafoclimática del suelo

El suelo alto andino de Pasos presenta las siguientes características: se encuentra en la zona alta de Marcavalle, perteneciente al distrito de Pucará, Huancayo - Junín. Está ubicado aproximadamente a una distancia aproximada de 10 Km del Distrito de Pucará, sobre una altitud de 3960 msnm, en una ladera con pendiente que varía de 35% a 43%, con presencia de vegetación natural dominado por el ichu (*Estipa ichu*) y otros. Esta zona presenta una intensa actividad agrícola, especialmente la producción del cultivo de papa (*Solanum tuberosum*). Al fondo de la depresión natural de esta zona, se observa el curso del manantial que constituye el inicio de la microcuenca del río Chanchas.

La litología del área de estudio se caracterizó por la existencia de rocas sedimentarias conocidas como grauvacas (presencia de detritus de rocas preexistentes). La existencia de este material rocoso hace presumir que se genera un material parental residuo-columial, es de profundidad efectiva moderada, que abarca aproximadamente 60 cm desde la superficie hasta la litosecuencia que gobierna el área en estudio, presenta un material parental de 9 cm de espesor, cuya naturaleza residual está conformada por rocas sedimentarias.

Dentro de las características climáticas, la zona presenta una precipitación pluvial promedio de 900 a 1000 mm.año⁻¹ y la temperatura del orden de 05 a 08 °C en promedio anual, esto condiciona el desarrollo de un suelo edafogenético conocido como Mollico, característico de una zona altoandina; el régimen de humedad es ústico y un régimen de temperatura frío a frío en el suelo.

Las características edafoclimáticas de la zona en estudio, han permitido un desarrollo pedogenético de un suelo moderadamente profundo con horizonte cámbico (Bw) delgado en el subsuelo, con una textura franco arcillosa a arcilloso en todo el perfil, de pH ácido, con valores de media a alta de bases cambiables ya que la acidez presente es debido a la presencia de ácidos orgánicos por efecto de la baja actividad de microorganismos degradadores de la materia or-

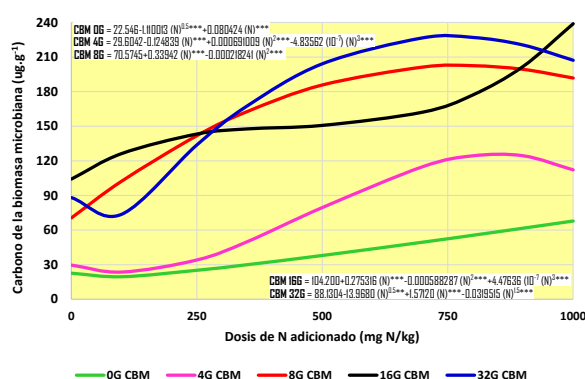
gánica ocasionado por la baja temperatura, esto limita seriamente la proliferación de estos organismos. De otro lado, la presencia del horizonte mollico permite el cultivo de papas nativas y otros cultivos como olluco y oca.

La pendiente condiciona seriamente la erosión hídrica en estos suelos, ya que presenta escurrimiento superficial de rápido a muy rápido; sin embargo, la presencia de vegetación natural permite el control en cierto modo el efecto erosivo, el desarrollo de la agricultura con surcos en sentido de la pendiente intensifica seriamente la erosión hídrica. La percolación que presenta el área en estudio permite la evacuación del agua a través del perfil, debido a que la densidad aparente del suelo es menor de 1 g.cm⁻³ que impide la compactación, esto condiciona la inexistencia de capas duras en todo el perfil del suelo que restrinja la circulación del agua y aire. En cuanto a la estructuración, el suelo presenta la formación de estructuras granular y migajoso, esto se debe al efecto del alto contenido de materia orgánica presente en el suelo, que viene promoviendo el horizonte mollico. El color del suelo es negro en húmedo en todo el perfil (10YR 2/1).

3.2 Fertilización nitrogenada y carbono de la biomasa microbiana del suelo

Figura 1

Influencia del Nitrógeno en la Biomasa Microbiana



La biomasa microbiana es considerada como parte viva de la MO del suelo, en esta parte viva se incluye: bacterias, actinomicetos, hongos, protozoarios, algas y microfauna. Es la parte más activa de la MO y

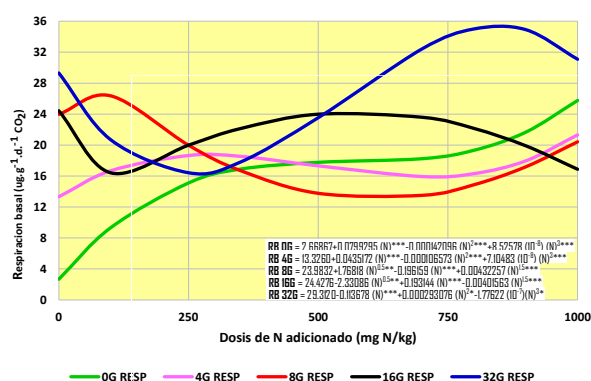
contiene aproximadamente de 2 al 5% del carbono orgánico (Jenkinson & Ladd, 1981) y del 1% al 5% del N total del suelo (Smith & Paul, 1990).

Las dosis de N adicionado al suelo tuvieron efectos favorables en el carbono de la biomasa microbiana del suelo; a medida que se incrementaron las dosis de N se observó aumentos en el CBM, dependiendo de las dosis del herbicida glifosato; para la dosis de glifosato más baja incluyendo al tratamiento testigo, los incrementos en el CBM fueron menores con el incremento de las dosis de N adicionado al suelo. Para las dosis de glifosato de 8, 16 y 32 L i.a./ha, los incrementos en el CBM fueron mayores, principalmente para el tratamiento con 32 L i.a./ha que alcanzó un máximo aproximado de 740 µg.g⁻¹ de CBM (figura 1). Se registraron efectos positivos del herbicida glifosato en el CBM, aun cuando no se adicionaron fuente nitrogenada alguna, tal como se observa los tratamientos testigos, para cada una de las dosis crecientes del herbicida.

De otro lado, los datos cuantitativos del CBM se ajustaron de manera variable para las dosis de N adicionado, los modelos regresionales fueron del orden de raíz cuadrado, cuadrático, cubico y cubico raíz, en cada uno de ellos los valores del coeficiente de determinación fueron altos, de igual modo el análisis de componente de cada uno de las ecuaciones regresionales fueron estadísticamente significativos.

3.3 La fertilización nitrogenada y respiración basal del suelo

De acuerdo a Parkin et al. (2015), la RBS es una medida de la producción de CO_2 y es resultado de la actividad metabólica de los microorganismos en el suelo, de raíces en actividad y de microorganismos: lombrices, nematodos e insectos. La respiración basal es un atributo positivo de la calidad de los suelos, es un indicador sensible de la descomposición de residuos, del giro metabólico del carbono orgánico del suelo y de los disturbios que ocurren en el ecosistema, se debe precisar que sus valores deben ser interpretados con cautela.

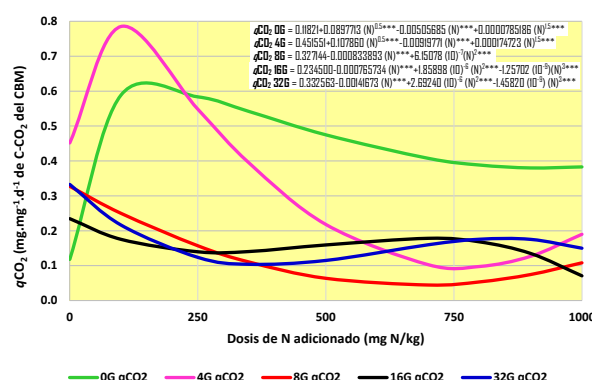
Figura 2*Influencia del Nitrógeno en la Respiración Basal del Suelo*

En la figura 2 se observa la relación que hay entre las dosis de N adicionado al suelo en función de la respiración basal del suelo en estudio para cada una de las dosis de glifosato adicionado. De manera general, con el incremento de las dosis de N adicionado, se incrementan en diferentes grados la RBS del suelo. El incremento en las dosis de glifosato estimuló aumentos en la RBS del suelo, de manera que para la máxima dosis de glifosato adicionado (32 L i.a./ha), se registró aproximadamente $35 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}\text{CO}_2$.

Para las dosis de 0 y 4 L i.a./ha de glifosato y hasta 250 mg N/kg, la RB manifestó un incremento cuadrático (ambos tratamientos con modelos regresionales cúbicos), mientras que las mayores dosis de glifosato (16 y 32 L i.a./ha) hasta una dosis de 250 mg N/kg las tendencias fueron en descenso de la RB para luego aumentar y que la tasa de incremento de la RB fue más alto para la dosis de 32 L i.a./ha.

3.4 Fertilización nitrogenada y el cociente metabólico del suelo

El cociente metabólico ($q\text{CO}_2$), llamado también respiración por unidad de biomasa microbiana, como una variable ecofisiológica de la actividad específica del suelo, predice que, a medida que determinada biomasa microbiana se torna más eficiente en la utilización de los recursos del ecosistema, pierde menos C en forma de CO_2 por la respiración y una mayor proporción de C se incorpora a los tejidos microbianos del suelo; de manera tal que, una BM “eficiente” ($< q\text{CO}_2$) presenta una menor tasa de respiración basal en relación a una misma BM “ineficiente” ($> q\text{CO}_2$).

Figura 3*Influencia del Nitrógeno en el Cociente Metabólico*

En la figura 3 se observa que a medida que se incrementa las dosis de N adicionado al suelo, el $q\text{CO}_2$ disminuye, este descenso es más impactante para las dosis de 0 y 4 L i.a./ha de glifosato aplicado al suelo; se observa que entre 120 – 130 mg N/kg adicionado, se alcanza los valores más altos de $q\text{CO}_2$ (aproximadamente 0.62 y 0.78 $\text{mg}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ de CO_2 del CBM, respectivamente), para luego descender, en ambos tratamientos, siendo que los datos se ajustaron en ambos casos a un modelo cúbico raíz.

Para las dosis de 8, 16 y 32 L i.a./ha de glifosato aplicado al suelo, se registró menores descensos del $q\text{CO}_2$ con el aumento de las dosis de N.

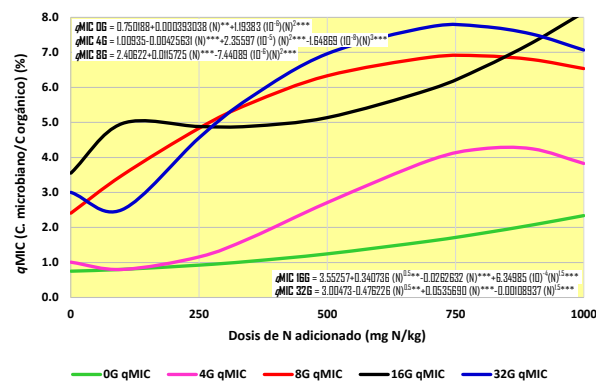
3.5 La fertilización nitrogenada y el cociente metabólico del suelo

La relación que existe entre el CBM y el carbono orgánico del suelo, es conocida como cociente microbiano ($q\text{MIC}$), este indicador microbiológico da una medida de la calidad de la MO del suelo. En circunstancias en que la biomasa microbiana se encuentra sobre el impacto de algún factor de estrés como: deficiencia de nutrientes, acidez, alta concentración de aluminio y otros, la capacidad de utilización del carbono disminuye, entonces la relación CBM/carbono orgánico disminuye ($< q\text{MIC}$), de manera contraria, la adición de materia orgánica de buena calidad o cambios del factor limitante para una condición favorable (aumento del pH, disminución de la concentración de aluminio o aumento en la disponibilidad de nutrientes), entonces la biomasa microbiana puede aumentar rápidamente ($> q\text{MIC}$), a pesar de que las concentra-

ciones de carbono orgánico del suelo permanezcan inalterados (Powlson et al., 1987).

Figura 4

Influencia del nitrógeno en el cociente microbiano



De manera general las dosis de N adicionado al suelo, ocasionaron aumentos en los valores del qMIC; para las menores dosis de glifosato aplicado (0 y 4 L. i.a./ha) esos incrementos registraron los valores más bajos, siendo que para una dosis de glifosato de 4 L. i.a./ha el valor de qMIC fue mayor que para 0 L. i.a./ha, a medida que se incrementaba las dosis de N adicionado al suelo altoandino del Perú. Cuando se hicieron aplicaciones de 8, 16 y 32 L.i.a./ha, se registraron ascensos en el qMIC a medida que aumentaba las dosis de N aplicado; por ejemplo el tratamiento con 32 L.i.a./ha de glifosato, ha registrado un valor de 7,8% para el qMIC, la misma que equivale aproximadamente a la aplicación de 750 mg N/kg.

3.6 El glifosato y el carbono de la biomasa microbiana del suelo

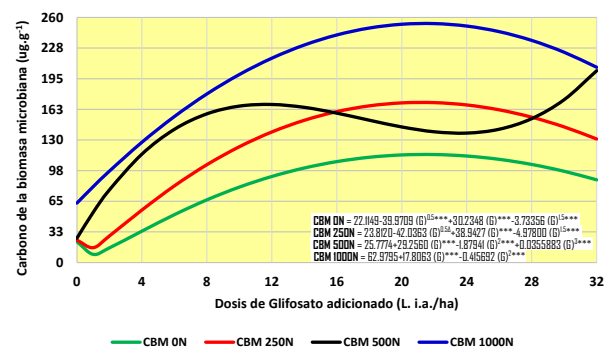
En la figura 5 se observa que con el aumento de las dosis del herbicida glifosato adicionadas al suelo, los valores del CBM también se ven incrementadas; además que el aumento de las dosis de N adicionadas al suelo permitieron incrementos en el CBM, estos incrementos fueron graduales, es decir los aumentos en el CBM fueron en el siguiente orden: 0, 250, 500 y 1000 mg N/kg, excepto para el tratamiento con 500 mg N/kg, los demás tratamientos siguieron distribuciones cubico raíz y cuadrática, donde los valores máximos de CBM correspondieron al rango de dosis de 20 – 24 L. i.a./ha, estos valores máximos correspondieron a: 115, 171 y 252 ug.g-1 de CBM para 0, 250 y

100 mg N/kg, respectivamente.

De otro lado, la fertilización nitrogenada estimuló a un incremento en el CBM sin la aplicación del herbicida glifosato, este estímulo fue mayor con una mayor dosis de N aplicado al suelo, siendo que el tratamiento testigo registró 22.11 62.98 ug.g-1 de CBM y el tratamiento con 1000 mg N/kg registró 62.98 ug.g-1 de CBM.

Figura 5

Influencia del glifosato en la biomasa microbiana

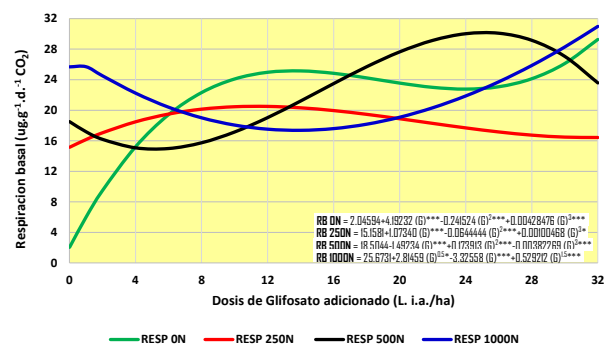


3.7 El glifosato y la respiración basal del suelo

La respiración basal del suelo altoandino se ve estimulada con el aumento en las dosis de glifosato adicionado, independiente de las dosis de N aplicado, los aumentos en la RB fueron más impactantes sin la aplicación del fertilizante nitrogenado, mientras que para una dosis de 1000 mg N/kg el modelo que relaciona las dosis de glifosato en función de la RB fue cubico raíz, en donde en el rango de 8 a 20 L.i.a./ha de glifosato hubo un descenso de la RB para luego continuar subiendo con mayores dosis de glifosato (figura 6).

Figura 6

Influencia del glifosato en la respiración basal



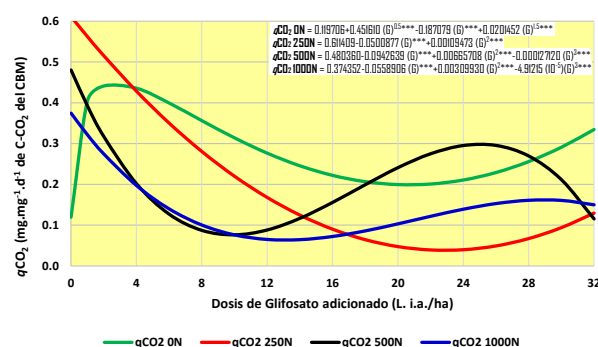
Cuando no se hizo aplicación alguna de glifosato, la fertilización nitrogenada ocasiono incrementos en la RB de acuerdo a las dosis de N aplicado, por ejemplo, para una dosis de 0 mg N/kg se registró una RB de 2.04 ug .g-1, mientras que para la mayor dosis de N, la evolución de CO_2 fue de 25.67 ug.g-1.

3.8 El glifosato y el cociente metabólico del suelo

En la figura 7 se observa que las dosis crecientes del herbicida glifosato ocasionaron descensos en los valores del cociente metabólico, principalmente el tratamiento con 250 mg N/kg cuya distribución cuadrática registra un descenso abrupto llegando hasta valores de 0.04 mg.mg-1.d-1 de CO_2 del CBM desde 0.61 mg.mg-1.d-1 de CO_2 del q CO_2 ; sin embargo, para el tratamiento con 1000 mg N/kg el descenso en el q CO_2 fue desde 0.37 mg.mg-1.d-1 de CO_2 del q CO_2 hasta 0.15 mg.mg-1.d-1 de CO_2 del q CO_2 , la disminución del cociente metabólico para el tratamiento con mayor dosis de N adicionado al suelo registraron los valores del cociente metabólico más bajos, además que los valores de descenso del q CO_2 para el tratamiento con 0 mg N/kg en función de las dosis de glifosato adicionado se dieron con valores altos del cociente metabólico. El modelo de regresión del q CO_2 en función de las dosis de glifosato aplicado para una dosis de 500 mg N/kg fue de naturaleza cúbica.

Figura 7

Influencia del glifosato en el cociente metabólico

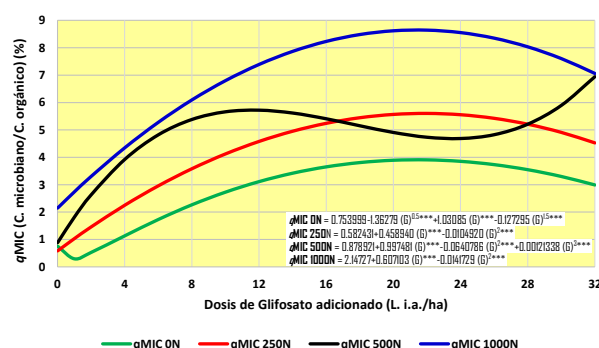


3.9 El glifosato y el cociente microbiano del suelo

En la figura 8 se observa la influencia de las dosis de glifosato en el cociente microbiano del suelo altoandino, a medida que se incrementan las dosis de glifosato se incrementan los valores de qMIC, estos incrementos en este indicador microbiológico se dan de manera gradual para las dosis crecientes de N adicionado, el orden decreciente de la influencia de las dosis de glifosato en el qMIC fue: 1000N > 500N > 250N > 0N. Los valores del qMIC fueron menores cuanto menor son las dosis de N adicionado al suelo altoandino, mientras que el tratamiento con 1000 mgN/kg registraron los valores más altos en qMIC para las dosis crecientes de glifosato. A excepción del tratamiento con 500 mg N/kg, los valores máximos de qMIC se registraron en el rango de 20 – 24 L.i.a./ha. Estos máximos valores de qMIC fueron de 8.6%, 5.8% y 4.0%, las que corresponden a los tratamientos con 1000, 250 y 0 mg N/kg respectivamente.

Figura 8

Influencia del glifosato en el cociente microbiano



4 Discusión

El nitrógeno es un elemento esencial para los microorganismos del suelo, las dosis crecientes de N ha permitido un aumento de la BMS, debido a que los microorganismos autóctonos de estos suelos altoandinos de la región central del país en primera instancia habrían tomado el N en sus formas iónicas de NO₃-y NH₄⁺ disponibles del suelo. A partir de aproximadamente 250 mg N/kg ocurrió un incremento sustancial en la BMS debido a que la disponibilidad de nitrógeno se ha incrementado con el aumento de las dosis

de fertilización (figura 1). Los datos son concordantes con los obtenidos por Jackson y Caldwell (1989), pues los valores indican que hay una adecuada cantidad de N disponible, pues con el incremento en las dosis de N adicionado al suelo altoandino, los microorganismos convertirían el carbono en biomasa microbiana. En un experimento, la adición de fertilizante nitrogenado soluble, ocasionó incrementos en el CBM y en la RBS en los diferentes tratamientos, probablemente esto sea debido a la disponibilidad de N que provienen de materiales de fácil descomposición, tal como lo afirma (Loveland, 2003).

Los microorganismos heterótrofos del suelo, usan al carbono orgánico del suelo como fuente de carbono y energía para sus actividades fisiológicas y metabólicas, este hecho cobra importancia en este estudio toda vez que el suelo altoandino de Pasos presenta un alto contenido de carbono orgánico, esto habría ocasionado aumentos en el CBM por efecto del carbono orgánico del suelo.

En la figura 1 también se observa que el glifosato ha ocasionado un incremento sustancial de la biomasa microbiana del suelo altoandino, este estímulo se debería a que el herbicida estaría siendo usado como sustrato carbonaceo por los microorganismos, esto explica por qué las dosis de 8, 16 y principalmente 32 L i.a./ha registraron aumentos crecientes en el CBM. Las diferencias porcentuales en el CBM para una fertilización de 750 mg N/kg, entre una dosis de 32 L i.a./ha de glifosato respecto al tratamiento testigo fue de aproximadamente 450%, esta diferencia se debe a la influencia del glifosato en el aumento del CBM.

Frioni (2006) sostiene que la RBS es una expresión más evidente de la mineralización de la materia orgánica del suelo. El suelo altoandino con alto contenido de carbono orgánico, en las condiciones del estudio no habría tenido suficiente tasa de mineralización, hecho que se observa en el tratamiento testigo (tratamiento con 0 L i.a./ha y 0 mg N/kg). Sin embargo, la fertilización nitrogenada ha ocasionado incrementos en la RBS, en otras palabras el nitrógeno habría aumentado la mineralización del carbono orgánico, con ello la población microbiana se habría incrementado y esto habría desencadenado la necesidad de tomar la MO del suelo. Se ha demostrado que la temperatura y de los fertilizantes solubles estimulan

la actividad de las poblaciones microbianas del suelo, las mismas que metabolizan materiales orgánicos de rápida descomposición (Loveland, 2003). Incrementos en las dosis de fertilización nitrogenada al suelo, ha permitido aumentos en la RBS como consecuencia de una mayor disponibilidad del N en el suelo.

Para las mayores dosis de Glifosato (16 y 32 Lia/ha) y sin aplicar N al suelo, la respiración basal registra altos valores y que gradualmente va decayendo para nuevamente subir, esto indica que el glifosato estaría siendo usado como fuente de carbono para intensificar la liberación de CO_2 por procesos respiratorios microbianos; para una mayor dosis de glifosato, mayor fue la RBS; reforzando la idea que el herbicida es utilizado como fuente de carbono fácilmente degradable por los microorganismos de este suelo altoandino.

El suelo altoandino con alto contenido de materia orgánica, habría sido ineficiente en el uso del carbono orgánico, esta mayor tasa de pérdida de CO_2 en la respiración por unidad de carbono incorporado en los tejidos microbianos, fue estimulado por el Glifosato hasta una dosis de 4 L i.a./ha. Hasta esta dosis de Glifosato, los microorganismos incrementaron sustancialmente la tasa respiratoria, pero no incorporaron eficientemente el carbono a su tejido microbiano hasta una fertilización aproximada de 100 mg N/kg (figura 2) y que con el incremento en las dosis de N, se ha promovido una mayor incorporación de carbono en los tejidos microbianos que la pérdida de CO_2 por respiración. Estos giros metabólicos son de gran importancia en la optimización de los recursos orgánicos del suelo cuando se hacen aplicaciones de glifosato y nitrógeno en estos suelos altoandinos.

A pesar de que estos suelos altoandinos con un alto contenido de carbono orgánico, el contenido de N disponible se habría incrementado con el aumento de las dosis de N aplicado en la forma de fertilizante, por lo que la biomasa microbiana habría estado sobre el impacto de falta de N disponible, estos cambios en la disponibilidad del N acarrearán aumentos en el CBM, sin que se haya incrementado el carbono orgánico del suelo. De otro lado, los incrementos en el qMIC fueron aún mayores con el aumento de la concentración de Glifosato, indicándonos que los microorganismos del suelo altoandino habrían tomado rápidamente el

carbono soluble proveniente del herbicida para intensificar su actividad metabólica (figura 3).

El incremento del CBM con el aumento de las dosis de Glifosato, indica que los microorganismos del suelo altoandino, habrían tomado el carbono soluble proveniente del herbicida, hasta llegar a un punto máximo que corresponde aproximadamente a 20 L i.a./ha del herbicida para luego descender. El agotamiento del carbono soluble proveniente del herbicida y el carbono orgánico proveniente del suelo orgánico de Pasos, serían las razones de la caída del CBM (figura 5). Por otro lado, la fertilización nitrogenada adicionada al suelo ha estimulado aún más el CBM. Los microorganismos del suelo no solo necesitan de carbono soluble sino también fuente nitrogenada para poder optimizar el CBM, de ahí que con una dosis de fertilización de 1000 mg N/kg se registraron los mayores valores del CBM.

La RBS fue mayor en aquellos tratamientos que se hicieron aplicaciones de glifosato (figura 6), este fenómeno puede ser debido a que el glifosato sería consumido por los microorganismos del suelo altoandino como una fuente de carbono disponible y de fácil degradabilidad, este hecho estimularía el metabolismo respiratorio microbiano del suelo, la misma que se manifestaría con incrementos en la RBS. Nuestros resultados concuerdan con los obtenidos con (Al-Rajab & Schiavon, 2010), quienes han monitoreado la mineralización del glifosato y del AMPA en varios suelos, ellos encontraron una inmediata y rápida tasa de degradación de glifosato, además han verificado que los microorganismos del suelo tendrían un sistema enzimático adecuado para degradar el glifosato.

Bohm et al. (2007) observaron mayor liberación de CO_2 en presencia de glifosato, esto se debe a que este herbicida es fácilmente metabolizable por los microorganismos del suelo. Gimsing et al. (2004), reportaron que la mineralización del glifosato, para 5 diferentes tipos de suelos, es directamente proporcional a la población de bacterias heterotróficas y principalmente con la frecuencia de bacterias del género *Pseudomonas* spp.

Bórtoli et al. (2012) encontraron que las tasas de liberación de CO_2 en aquellos suelos que se aplicaron glifosato, promovieron aumentos en la RBS hasta el día 30 de incubación, esto estaría asociado con

las cantidades de sustratos lábiles y que los menores valores fueron observados después de los 55 días.

De otro lado, un qCO_2 bajo, indica una economía en el uso de energía y supuestamente refleja un ambiente más estable o más próximo de su estado de equilibrio. El índice qCO_2 en la propuesta de Anderson y Domsch (1993), permite relacionar la propuesta de la optimización energética en ecosistemas en desarrollo y es equivalente a la RBS por unidad de biomasa. Este índice es alto en ecosistemas jóvenes, mientras que este índice es bajo en ecosistemas maduros. En los suelos degradados hay menor actividad de los microorganismos, por lo que los valores del qCO_2 son mayores, esto indica que estos ecosistemas son inmaduros. En el suelo altoandino de Pasos, el qCO_2 tuvo una tendencia al descenso con el aumento de las dosis de glifosato (figura 7).

El glifosato presenta una rápida degradación en el suelo, esto depende principalmente de la actividad microbiana del suelo. Los microorganismos edáficos pueden quebrar los enlaces C-P y C-N, con ello sintetizando sarcocina o ácido aminometilfosfónico (AMPA), que posteriormente podrían ser degradados a tasas mucho más lentas. von Wirén-Lehr et al. (1997) sostienen que las tasas de mineralización de este herbicida, están relacionadas a la actividad microbiana, así como a la biomasa microbiana; finalmente estos hechos pueden determinar la permanencia del glifosato en el suelo.

La adición de este herbicida, afecta la actividad microbiana del suelo, así como también queda afectada otras variables biológicas del sustrato (Biederbeck et al., 2005). Los microorganismos están estrechamente relacionados con varias funciones que tienen una importancia directa con la producción y la sustentabilidad: la participación en los ciclos biogeoquímicos de los nutrientes, la mineralización de la MO, la inmovilización y solubilización de nutrientes, entre otros. Una de las variables biológicas del suelo que el glifosato afecte de manera significativa es la RBS (Turco et al., 2015).

El qCO_2 permite evaluar el flujo de la energía con respecto a la biomasa microbiana del suelo. Los valores descendentes encontrados en el suelo altoandino de Pasos con la aplicación del glifosato indican cambios en la fisiología microbiana, esto posiblemente

te sea debido a que las poblaciones microbianas han sido alteradas en su metabolismo (cifras mayores de RBS), debido a la incorporación del herbicida. Esto indica una rápida degradación y que estaría asociada a una menor residualidad del herbicida.

En condiciones de campo, algunos estudios han demostrado efectos pequeños o nulos del herbicida glifosato en la actividad de los microorganismos del suelo (Ferreira et al., 2006), otros investigadores han registrado efectos considerables en la actividad microbiana. Wardle y Parkinson (1990) sostienen que la presencia del herbicida en el suelo, se ha relacionado significativamente con incrementos en las poblaciones y actividad de bacterias del suelo. De otro lado, se ha investigado que la degradación del glifosato hasta formas de AMPA y CO_2 está asociada a la actividad microbiana y a otros factores que modifican esa actividad microbiana. En nuestro estudio encontramos que el glifosato si ha afectado las actividades metabólicas de los microorganismos autóctonos del suelo altoandino.

Un aspecto fundamental que no se ha tratado en este estudio viene a ser la persistencia de este herbicida en estos suelos y esto está estrechamente relacionado con la susceptibilidad a la degradación del glifosato y naturalmente relacionado con el efecto de este herbicida en las actividades metabólicas de los microorganismos del suelo altoandino. Varios investigadores sostienen que la susceptibilidad a la degradación del glifosato por los microorganismos depende de la textura del suelo. (Sparks, 2003) sostiene que la interacción del glifosato - componentes orgánicos e inorgánicos daría información para predecir y comprender su comportamiento en el ecosistema. De otro lado, se sostiene que los componentes de la fracción mineral (arcillas y óxidos de aluminio, hierro y manganeso) tienen efectos significativos en los fenómenos de adsorción-desorción del herbicida, esto se debería a su elevada superficie específica y a su reactividad que presenta el glifosato.

En una investigación, las aplicaciones de glifosato en dosis de 234 mg ia/kg de suelo, estimuló la actividad microbiana; pero otros autores como Bohm et al. (2008) y Gomez et al. (2009) detectaron menores tenores del CBM; las causas de esas diferencias no fueron estudiados, pero pueden estar asociadas a las

características del suelo y la actividad microbiana.

En la figura 7 se observa que el tratamiento testigo (sin N adicionado) registra un aumento del qCO_2 hasta aproximadamente 4 L ia/ha, los mayores valores del qCO_2 fueron obtenidos para tratamientos con glifosato. Este resultado es consecuencia de la mayor actividad microbiana, con mayor liberación de CO_2 por unidad de CBM, provocado por la presencia del glifosato que está actuando como sustrato fácilmente asimilable para el desarrollo de la actividad microbiana.

De otro lado, en general con el aumento de las dosis de glifosato adicionado, hubo una disminución del qCO_2 , es decir una mayor eficiencia (figura 7); el qCO_2 es uno de los indicadores biológicos del equilibrio del suelo, a medida que la biomasa microbiana se torna más eficiente, menos carbono es liberado como CO_2 por la respiración y mayor proporción del carbono es incorporado a más biomasa microbiana (Anderson & Domsch, 1990). Los factores de estrés (herbicidas, metales pesados, pH, limitaciones de nutrientes), así como factores de perturbación (condiciones ambientales) afectan ese metabolismo. La actividad microbiana, medida por la RBS, fue mayor en los tratamientos con aplicación de glifosato. Los tratamientos con este herbicida, presentaron aumento en la evolución de CO_2 .

Como sabemos, el qMIC es un indicador microbiológico que da una medida de la calidad de la materia orgánica del suelo. Los valores bajos del qMIC se registraron cuando las dosis de glifosato fueron menores (0-8 L i.a. /ha), este sería debido a que hay una disminución de la capacidad de utilización del carbono, pero a medida que aumentan las dosis del glifosato, este último actuando como fuente de materia orgánica de buena calidad, que mejora la calidad del carbono orgánico para los microorganismos, la biomasa microbiana aumenta rápidamente, consiguiendo incrementarse el qMIC, especialmente para los tratamientos con 1000 mg N/kg, a pesar que las concentraciones de carbono orgánico del suelo hayan permanecido inalterados (Powlson et al., 1987).

5 Conclusiones

1. Las dosis de N adicionado al suelo altoandino ocasionaron incrementos en el CBM y la RBS, el incremento en el CBM fueron mayores en adiciones de glifosato.
2. El incremento en las dosis de N adicionado al suelo, ocasionó descensos en el qCO_2 y aumentos en el qMIC.
3. Incrementos en las dosis de glifosato, generaron aumentos en el CBM, si como también en la RBS.
4. Las adiciones de glifosato al suelo altoandino, ocasionaron descensos en el qCO_2 , así como también
5. incrementos en el qMIC.

Referencias

- Abril, A. (2003). ¿Son Los Microorganismos Edáficos Buenos Indicadores de Impacto Productivo En Los Ecosistemas? *Ecología austral*, 13(2), 195-204. Consultado el 5 de agosto de 2023, desde http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1667-782X2003000200008&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Al-Rajab, A. J., & Schiavon, M. (2010). Degradation of ^{14}C -glyphosate and aminomethylphosphonic acid (AMPA) in three agricultural soils. *Journal of Environmental Sciences*, 22(9), 1374-1380. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60264-3](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60264-3)
- Anderson, T.-H., & Domsch, K. H. (1990). Application of eco-physiological quotients (qCO_2 and qD) on microbial biomasses from soils of different cropping histories. *Soil Biology and Biochemistry*, 22(2), 251-255. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(90\)90094-G](https://doi.org/10.1016/0038-0717(90)90094-G)
- Anderson, T.-H., & Domsch, K. H. (1993). The metabolic quotient for CO_2 (qCO_2) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 25(3), 393-395. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(93\)90140-7](https://doi.org/10.1016/0038-0717(93)90140-7)
- Arshad, M., & Martin, S. (2002). Identifying critical limits for soil quality indicators in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 88(2), 153-160. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00252-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00252-3)
- Biederbeck, V., Zentner, R., & Campbell, C. (2005). Soil microbial populations and activities as influenced by legume green fallow in a semiarid climate. *Soil Biology and Biochemistry*, 37(10), 1775-1784. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.02.011>
- Bohm, G. M. B., Castilhos, D., Pigosso, G., Trichez, D., & Rombaldi, C. V. (2007). Efeito do controle de plantas concorrentes na biomassa e atividade microbiana em planossolo cultivado com soja BRS 244RR. *Revista brasileira de agrociencia*, 13(4), 503-508. Consultado el 5 de agosto de 2023, desde <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5705370>
- Bohm, G. M. B., Genovese, M. I., Pigosso, G., Trichez, D., & Rombaldi, C. V. (2008). Resíduos de glifosato e ácido aminometilfosfônico e teores de isoflavonas em soja BRS 244 RR e BRS 154. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 28, 192-197. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612008000500030>
- Bórtoli, P. V., Verdenelli, R. A., Conforto, C., Vargas Gil, S., & Meriles, J. M. (2012). Efectos Del Herbicida Glifosato Sobre La Estructura y El Funcionamiento de Comunidades Microbianas de Dos Suelos de Plantaciones de Olivo. *Ecología austral*, 22(1), 33-42. Consultado el 5 de agosto de 2023, desde http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1667-782X2012000100004&lng=es&nrm=iso&tlng=es

- Ferreira, E., Santos, J., Silva, A., Vargas, L., & Reis, M. (2006). Glyphosate No Controle de Biótipos de Azevém e Impacto Na Microbiota Do Solo. *Planta Daninha*, 24(3), 573-578. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582006000300021>
- Frioni, L. (2006). *Microbiología: Básica, Ambiental y Agrícola*. Facultad de Agronomía, Universidad de la República. https://www.ciaorganico.net/documypublic/382_infoagronomo.net-_Microbiologia_basica_ambiental_y_agricola_lilian_friomi_2006.pdf
- Gimsing, A. L., Borggaard, O. K., & Bang, M. (2004). Influence of soil composition on adsorption of glyphosate and phosphate by contrasting Danish surface soils: Adsorption of glyphosate and phosphate in soils. *European Journal of Soil Science*, 55(1), 183-191. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2003.00585.x>
- Gomez, E., Ferreras, L., Lovotti, L., & Fernandez, E. (2009). Impact of glyphosate application on microbial biomass and metabolic activity in a Vertic Argiudoll from Argentina. *European Journal of Soil Biology*, 45(2), 163-167. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2008.10.001>
- Harris, R. F., & Bezdicek, D. F. (2015, octubre). Descriptive Aspects of Soil Quality/Health. En J. Doran, D. Coleman, D. Bezdicek & B. Stewart (Eds.), *SSSA Special Publications* (pp. 23-35). Soil Science Society of America and American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c2>
- Jackson, R. B., & Caldwell, M. M. (1989). The timing and degree of root proliferation in fertile-soil microsites for three cold-desert perennials. *Oecologia*, 81(2), 149-153. <https://doi.org/10.1007/BF00379798>
- Jenkinson, D. S., & Ladd, J. N. (1981). Microbial biomass in soil: Measurement and turnover. En E. A. Paul & J. N. Ladd (Eds.), Marcel Dekker, Inc. Consultado el 5 de agosto de 2023, desde <https://repository.rothamsted.ac.uk/item/8ww60/microbial-biomass-in-soil-measurement-and-turnover>
- Jenkinson, D., & Powlson, D. (1976). The effects of biocidal treatments on metabolism in soil—V. *Soil Biology and Biochemistry*, 8(3), 209-213. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(76\)90005-5](https://doi.org/10.1016/0038-0717(76)90005-5)
- Loveland, P. (2003). Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: A review. *Soil and Tillage Research*, 70(1), 1-18. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00139-3](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00139-3)
- Parkin, T. B., Doran, J. W., & Franco-Vizcaíno, E. (2015, octubre). Field and Laboratory Tests of Soil Respiration. En J. W. Doran & A. J. Jones (Eds.), *SSSA Special Publications* (pp. 231-245). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub49.c14>
- Powlson, D., Prookes, P., & Christensen, B. (1987). Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. *Soil Biology and Biochemistry*, 19(2), 159-164. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90076-9](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90076-9)
- Smith, J. L., & Paul, E. A. (1990). The significance of soil microbial biomass estimations. En J.-M. Bollag (Ed.), *Soil Biochemistry* (1ra, p. 42, Vol. 6). Routledge. Consultado el 5 de agosto de 2023, desde <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9780203739389-7/significance-soil-microbial-biomass-estimations-smith-paul>
- Sparks, D. L. (2003). *Environmental Soil Chemistry* (2nd ed). Academic Press.
- Tótolá, M. R., & Chaer, G. M. (2002). Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade dos solos. https://www.researchgate.net/publication/285842908_Microrganismos_e_processos_microbiologicos_como_indicadores_da_qualidade_dos_solos
- Turco, R. F., Kennedy, A. C., & Jawson, M. D. (2015, octubre). Microbial Indicators of Soil Quality. En J. Doran, D. Coleman, D. Bezdicek & B. Stewart (Eds.), *SSSA Special Publications* (pp. 73-90). Soil Science Society of America and American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c5>

- Vance, E., Brookes, P., & Jenkinson, D. (1987). An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 19(6), 703-707. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90052-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90052-6)
- von Wirén-Lehr, S., Komoßa, D., Gläßgen, W. E., Sandermann, H., & Scheunert, I. (1997). Mineralization of [14C] glyphosate and its plant-associated residues in arable soils originating from different farming systems. *Pesticide Science*, 51(4), 436-442. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9063\(199712\)51:4<436::AID-PS630>3.0.CO;2-7](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9063(199712)51:4<436::AID-PS630>3.0.CO;2-7)
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29. Consultado el 5 de agosto de 2023, desde https://journals.lww.com/soilsci/citation/1934/01000/an_examination_of_the_degtjareff_method_for.3.aspx
- Wardle, D., & Parkinson, D. (1990). Effects of Three Herbicides on Soil Microbial Biomass and Activity. *Plant and Soil*, 122(1), 21-28. Consultado el 5 de agosto de 2023, desde <https://www.jstor.org/stable/42938384>