

Evaluación de micorrizas arbusculares en interacción con abonos orgánicos como coadyuvantes del crecimiento en la producción hortícola del Valle Alto de Cochabamba, Bolivia

Kattia Rojas Rodriguez¹, Noel Ortuño²

¹Departamento de Ciencias Exactas e Ingenierías. Universidad Católica Boliviana.

²Fundación PROINPA

e-mail: ¹kattia.rojas@gmail.com, ²nortuno@proinpa.org

Resumen

Dentro de los numerosos factores que determinan el desarrollo óptimo de los cultivos, la nutrición es uno de los más importantes. De manera general, las hortalizas son exigentes en suelos fértiles y ricos en materia orgánica y demandan una gran cantidad de nutrientes. Sin embargo en los últimos años, el uso incorrecto de los fertilizantes químicos ha tenido impactos negativos en los ecosistemas, lo que ha obligado a desarrollar nuevas estrategias ecológicas basadas en interacciones biológicas beneficiosas para incrementar la disponibilidad de nutrientes en el suelo. Con el objetivo de evaluar el efecto de la aplicación de micorrizas arbusculares como coadyuvantes del crecimiento en interacción con abonos orgánicos en la producción hortícola del Valle Alto de Cochabamba, se estableció dos ensayos en la localidad "La Villa" de la provincia Punata, en dos especies hortícolas: cebolla (*Allium cepa*) y papa (*Solanum tuberosum*). El diseño experimental utilizado fue un diseño completamente al azar con 6 tratamientos y 4 repeticiones. Los tratamientos fueron: T1 = Micorriza (*Glomus fasciculatum*), T2 = Humus de lombriz, T3 = Micorriza + humus de lombriz, T4 = Micorriza + gallinaza, T5 = Micorriza + gallinaza + Humus de lombriz, T6 = Testigo (fertilizante químico). Se evaluó parámetros de desarrollo y de crecimiento (altura de planta, rendimiento, longitud radical), porcentaje de colonización de micorrizas en la raíz, la relación costo/beneficio y efectos sobre el medio ambiente de los productos utilizados. Los resultados mostraron un efecto positivo de los tratamientos inoculados con micorriza, gallinaza y humus de lombriz sobre el crecimiento y desarrollo de los cultivos frente al testigo. Estos tratamientos además, no presentan impactos negativos a la salud y al medio ambiente, por el contrario presentan impactos positivos sobre el suelo y desarrollo de los cultivos.

Palabras clave: Micorrizas arbusculares, humus de lombriz, gallinaza, nutrición, fertilización, simbiosis, coadyuvantes del crecimiento, Cochabamba.

1 Introducción

Las hortalizas representan un grupo de cultivos de amplia demanda en todo el mundo por su alto valor nutricional, diversos usos y adaptabilidad a diferentes zonas. Entre las principales hortalizas consumidas en el mundo se tiene a la cebolla, tomate, ajo y papa [7].

La cebolla es originaria de Asia Central, es una de las hortalizas más importantes en el mundo, gracias a sus virtudes alimenticias. Se caracteriza por tener proporciones significativas de Calcio, Fósforo, vitamina A y ácido ascórbico [14].

En Bolivia, la mayor producción está concentrada en los departamentos de Cochabamba, Tarija y La Paz, siendo Cochabamba el mayor productor (40%) a nivel nacional [1].

Por otro lado, el cultivo de papa es originario de la zona andina de América del Sur que comprende los países de Perú, Ecuador, Bolivia y Chile [16]. Este cultivo es considerado como uno de los principales alimentos a nivel mundial, superado solamente por el arroz, el trigo y el maíz [9]. Ocupa el primer lugar dentro de los vegetales que más se consumen, por su contribución a la dieta humana en calorías, vitaminas, proteínas y sales minerales [9].

En Bolivia, el cultivo de papa es importante desde el punto de vista histórico, económico, nutritivo y social. Actualmente, la producción de papa involucra a más de 200.000 familias que cultivan un total de 129.230 ha en 7 de los 9 departamentos del país [4]. Entre las principales zonas productoras del país se destacan las circundantes al Lago Titicaca, el Valle Alto de Cochabamba, las pampas de Lequezana en el departamento de Potosí y los valles mesotérmicos de Santa Cruz [4].

La producción de estos dos cultivos en nuestro país es relativamente baja debido a varios factores limitantes, tales como problemas fitosanitarios, problemas de fertilidad de los suelos, elevados costos de insumos externos como son los pesticidas y fertilizantes. Por otro lado, el uso de estos productos implica riesgos a la salud del agricultor y el medio ambiente.

En los últimos años el consumo de fertilizantes químicos a nivel mundial se ha incrementado alarmantemente desde su introducción en la denominada revolución verde. Hace medio siglo los agricultores aplicaban 17 Tg de fertilizantes en sus campos; hoy se utiliza ocho veces ese volumen [6].

En la tabla 1, se puede apreciar el consumo de fertilizantes químicos en los países de América Latina. Si bien el consumo de fertilizantes en Bolivia es bajo en relación a los otros países, éste se duplicó en tan solo 5 años [7].

Tabla 1. Consumo de fertilizantes químicos en América Latina en el periodo 1996–2002 [7]

País	1996	2002
	--- t ---	--- t ---
Argentina	855.200	739.526
Brasil	5.020.000	7.682.000
Bolivia	6.769	13.741
Chile	423.000	455.000
Colombia	485.000	691.500
México	1.636.400	1.711.900
Perú	185.300	274.007
Ecuador	118.000	229.522
Venezuela	305.000	300.000

Hasta hace algunos años en el Valle Alto no se utilizaban fertilizantes o pesticidas de ningún tipo; los suelos se hacían descansar con rotación de cultivos manteniendo su fertilidad [5]. Pero en la actualidad la producción agropecuaria ha cambiado. La presencia de riego ha permitido la introducción de nuevos cultivos, diversificándose la producción. Algunos agricultores producen el mismo cultivo durante casi todo el año, la incorporación de materia orgánica es mínima, el tiempo de descanso de las parcelas se ha reducido y en algunos casos se ha eliminado, lo que ha ocasionado una disminución de los nutrientes en el suelo y mayor incidencia de plagas y enfermedades [5]. Estos problemas repercuten en la baja productividad y bajos rendimientos de los cultivos de alto valor.

Para aumentar el rendimiento de los cultivos y lograr la subsistencia familiar, los agricultores utilizan una serie de insumos externos, tales como fertilizantes químicos y pesticidas, que aplicados en forma incorrecta y excesiva pueden ocasionar la contaminación de los suelos y las aguas subterráneas.

Como respuesta a estos problemas, actualmente se investigan nuevas alternativas para aumentar la fertilidad del suelo y garantizar volúmenes de producción aceptables en cultivos de interés agrícola, a través de estrategias ecológicas. Entre las alternativas propuestas se incluye el uso de biofertilizantes basados en interacciones biológicas beneficiosas y procesos naturales. Dentro de estas interacciones juegan un papel importante los microorganismos simbioses del suelo, como las micorrizas que inciden favorablemente en el desarrollo de la planta [18].

La micorriza es la asociación entre la raíz de la mayoría de las plantas terrestres, tanto cultivadas como silvestres, y cierto tipo de hongos [2]. Esta asociación es benéfica, tanto para el hongo, como para la planta. El hongo coloniza el interior de la raíz y, por medio de la red externa de hifas, sirve de puente para obtener nutrientes minerales y agua que no están al alcance del sistema radicular de la planta [14], mejorando así aspectos de desarrollo y crecimiento.

Otra alternativa propuesta con frecuencia es el uso de abonos orgánicos como el humus de lombriz y gallinaza que tienen mayores beneficios sobre el crecimiento de los cultivos respecto a otros abonos orgánicos tradicionales.

2 Objetivos

El objetivo que se planteó en este trabajo de investigación es evaluar experimentalmente la eficiencia de micorrizas arbusculares, solas y en interacción con abonos orgánicos (Humus de lombriz y gallinaza), en la producción hortícola del Valle Alto de Cochabamba utilizando parámetros agronómicos y parámetros de evaluación micorrízica. Al mismo tiempo realizar un análisis económico y análisis ambiental de la utilización de micorrizas arbusculares, humus de lombriz y gallinaza frente al uso de fertilizantes químicos.

3 Metodología

El diseño experimental utilizado fue un diseño completamente al azar con 6 tratamientos y cuatro repeticiones. El estudio se desarrolló en dos cultivos diferentes: cebolla (*Allium cepa*) y papa (*Solanum tuberosum*). La semilla de cebolla utilizada fue la variedad Criolla Roja, producida por el propio agricultor y en la papa se utilizó la variedad Robusta, también producida por el agricultor.

Los tratamientos utilizados en cada uno de los cultivos se describen a continuación:

Tratamiento 1: Micorriza (T₁)

Tratamiento 2: Humus de lombriz (T₂)

Tratamiento 3: Micorriza + humus de lombriz (T₃)

Tratamiento 4: Micorriza + gallinaza (T₄)

Tratamiento 5: Micorriza + gallinaza + humus de lombriz (T₅)

Tratamiento 6: Testigo (T₆)

La parcela de investigación del cultivo de cebolla fue de 19,3 m de ancho por 26,0 m de largo y la parcela del cultivo de papa fue de 25,0 m de largo por 20,0 m de ancho.

Antes de la implementación del ensayo, se tomaron muestras de suelo en los dos cultivos para determinar el nivel de fertilidad. Los parámetros analizados fueron la textura, materia orgánica, pH, Nitrógeno, Potasio y Fósforo disponible.

La aplicación de los tratamientos en el cultivo de cebolla se hizo en el primer aporque (30 días después del trasplante), cuando las plantas tenían una altura promedio de 27,5 cm.

La especie de micorriza que se utilizó fue *Glomus fasciculatum*, en una dosis de 15 kg ha⁻¹. La técnica de inoculación fue la aspersión, directamente al cuello de la planta. Se aplicó 200 kg ha⁻¹ de humus de lombriz y 6 t ha⁻¹ de gallinaza también directamente al cuello de la planta y posteriormente se procedió a realizar el aporque.

El testigo (práctica que realiza el agricultor) es el tratamiento que recibió fertilización química. Se aplicó 500 kg ha⁻¹ de urea, dosis utilizada por el agricultor normalmente.

En el cultivo de papa los tratamientos se aplicaron al momento de la siembra. La dosis de los productos utilizados fue la misma que en el cultivo de cebolla.

La técnica de inoculación de micorrizas que se utilizó fue por aspersión a surco abierto sobre la semilla. El humus de lombriz y la gallinaza se aplicaron directamente al surco y posteriormente se procedió al tapado de la semilla.

En este cultivo el testigo recibió fertilización química al momento de la siembra y al primer aporque (85 días después de la siembra). Durante la siembra se aplicó una mezcla de urea (5 kg) y superfosfato de amonio (5 kg), y al primer aporque se aplicó 5 kg de urea. Esta dosis equivale a 650 kg de urea por hectárea y 350 kg de superfosfato de amonio por hectárea.

El manejo de los tratamientos en cada cultivo fue el mismo que con el testigo: se hizo el mismo número de aporques, deshierbes, riegos y otras prácticas culturales que realiza el agricultor.

Para determinar el efecto de los tratamientos, durante todo el ciclo de los cultivos se hicieron evaluaciones sobre aspectos morfológicos y de desarrollo. En el cultivo de cebolla se evaluó la altura de planta cada 15 días desde la aplicación de los tratamientos hasta la cosecha, la medición se realizó desde el cuello de la planta hasta la axila de la hoja más joven, posteriormente se procedió a la cosecha. El área de muestreo fue de 1 m de largo por 0,60 m de ancho para las distintas repeticiones de cada tratamiento. Después de realizar la cosecha de cada tratamiento se procedió al pesaje de las muestras para obtener el rendimiento en t ha⁻¹ y a cada muestra cosechada se realizaron las siguientes mediciones: grosor del tallo (cm) y ancho del bulbo (cm), con la ayuda de un calibrador; longitud radical (cm) con regla graduada y por último número de hojas por planta.

Respecto a los parámetros evaluados en el cultivo de papa, 45 días después de la siembra se estimó el porcentaje de emergencia y se evaluó la altura de planta cada 15 días hasta la segunda floración. La cosecha se realizó con el agricultor dueño de la

parcela, el área de muestreo para cada repetición fue de 3 m de largo por 1,4 m de ancho. Después se procedió a la clasificación de la papa según el calibre o tamaño para posteriormente obtener el peso y el rendimiento en t ha⁻¹ de cada calibre para cada uno de los tratamientos. Paralelamente se realizó la medición de la longitud radical a cada una de las plantas cosechadas con la ayuda de unidad métrica, y se hizo el conteo del número de tubérculos obtenidos por planta.

Otro parámetro evaluado fue la frecuencia e intensidad de colonización en la raíz de cada cultivo. Esta evaluación consistió en la cuantificación microscópica de las estructuras fúngicas (hifas, arbusculos y vesículas). Se utilizó la metodología propuesta por Phillips y Hayman en 1970 [11] que consiste en calentar las raíces en una solución de KOH a 80 ° C durante 1 hora, después se las enjuaga con HCl y para terminar se sumergen en fucsina ácida a 80 ° C por espacio de 15 minutos, para posteriormente identificarlas en un microscopio.

Los resultados obtenidos para cada una de las variables evaluadas fueron sometidos a análisis de varianza en el programa estadístico SAS. Los modelos utilizados fueron los siguientes:

- Con los datos de altura de planta obtenidos, se construyó una curva de crecimiento para cada cultivo con el modelo de regresión polinomial cuadrática, cuya ecuación es:

$$Y_j = \beta_0 + \beta_1 X_j + \beta_2 X_j^2 + \xi_j \quad (1)$$

Donde Y_j es la altura de planta registrada y estimada, X_j son los días después de la aplicación de tratamientos de la j -ésima evaluación, $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ son los coeficientes de regresión, ξ_j es el valor residual.

- Las variables grosor de tallo, ancho de bulbo, largo de raíz, número de hojas y rendimiento del cultivo de cebolla fueron procesados con el modelo lineal mixto [15] al igual que las variables longitud de raíz, número de tubérculos, coeficientes de regresión y rendimiento (tubérculos de tamaño grande, mediano, pequeño y total) del cultivo de papa, cuya ecuación es:

$$Y_{jk} = \mu + \beta_j + \tau_k + \xi_{jk} \quad (2)$$

Donde j es el número de fila, k es el número de tratamiento, Y_{jk} es el valor de una variable de respuesta de la j -ésima fila y k -ésimo tratamiento, μ es la constante o media común, β_j es el efecto fijo de la j -ésima fila $\sim \text{DNII}(0, \sigma_b^2)$, τ_k es el efecto fijo del k -ésimo tratamiento y ξ_{jk} es el efecto aleatorio del residuo $\sim \text{DNII}(0, \sigma_r^2)$.

Los tratamientos fueron comparados con la prueba Rango Studentizado de Tukey's a $p=0,05$ y la sentencia de Lsmeans a la $p=0,05$.

- Los tratamientos para la variable emergencia de plantas en el cultivo de papa, fueron comparados con el procedimiento de promedios mínimos cuadrados (Lsmeans) y la distribución de Chi cuadrado a $p=0,05$.

- Los datos de frecuencia e intensidad de colonización se procesaron con el modelo lineal generalizado bajo el supuesto de distribución binomial [10]:

$$\eta_k = \text{logit} \left[\frac{\pi_k}{1 - \pi_k} \right] = \eta + \tau_k \quad (3)$$

Donde k es el número de tratamiento, η_k es el valor generalizado de la relación del número de raíces colonizadas sobre el total de raíces evaluadas (frecuencia) y porcentaje de raíz colonizada con micorriza sobre la longitud total de la raíz evaluada (intensidad) en el k -ésimo tratamiento, η es una constante común y τ_k es el efecto fijo del k -ésimo tratamiento. Los tratamientos fueron comparados con el procedimiento de promedios mínimos cuadrados (Lsmeans) y la distribución de Chi cuadrado a $p=0,05$.

La evaluación ambiental se realizó mediante la elaboración de una matriz de identificación de impactos ambientales basada en la matriz interactiva de Leopold. Se utilizó como modelo la matriz desarrollada por el Centro de Derecho Ambiental y Recursos Ambientales de Costa Rica (CEDARENA) [3], para el proyecto denominado “Evaluación del Impacto Ambiental y de Capacidad Institucional de la Región Centroamericana frente a la Liberalización Comercial: Estudios de Caso de Costa Rica y Guatemala”. La matriz se limitó solamente a la etapa de fertilización dado que la aplicación de los productos se realizó en esta etapa y cada insumo utilizado fue considerado como acción. Los impactos ambientales en la matriz fueron expresados por medio de colores [3]:

Verde oscuro: Impacto Positivo Alto

Verde claro: Impacto Positivo Moderado

Rojo: Impacto Negativo Crítico

Rosado: Impacto Negativo Severo

Naranja: Impacto Negativo Moderado

Amarillo: Impacto Negativo Leve

El método de evaluación económica que se utilizó fue el análisis incremental, primero se determinaron los costos variables de cada tratamiento como costo de insumos, aplicación de cada insumo y mano de obra. Posteriormente se calculó el beneficio bruto (BB) para cada tratamiento a partir de la cantidad de producto obtenido y el precio de venta en el mercado, y por último se calculó el beneficio neto (BN) a partir de los costos variables y del beneficio bruto.

4 Resultados y discusión

Cultivo de cebolla

Las curvas de crecimiento para la variable altura de planta muestran una mejor respuesta del tratamiento T1 (Micorriza) y T3 (Micorriza + humus de lombriz) en las primeras evaluaciones, pero a partir de los 30 días se puede observar el efecto positivo de la micorriza combinada con materia orgánica, siendo el T5 (Micorriza + gallinaza + humus de lombriz) el que presentó mayor altura final. El tratamiento T6 (testigo) presentó menor altura en todas las evaluaciones, con un crecimiento de planta bastante reducido respecto a los demás tratamientos (Figura 1).

Se observa que las micorrizas presentan mayor efecto en beneficio de la planta, cuando se encuentran combinadas con materia orgánica. Este hecho se puede atribuir a que la incorporación de materia orgánica tiene efectos positivos en las propiedades del suelo que junto con el efecto positivo de las micorrizas sobre la absorción de nutrientes, se manifiestan en un mayor crecimiento de planta [12].

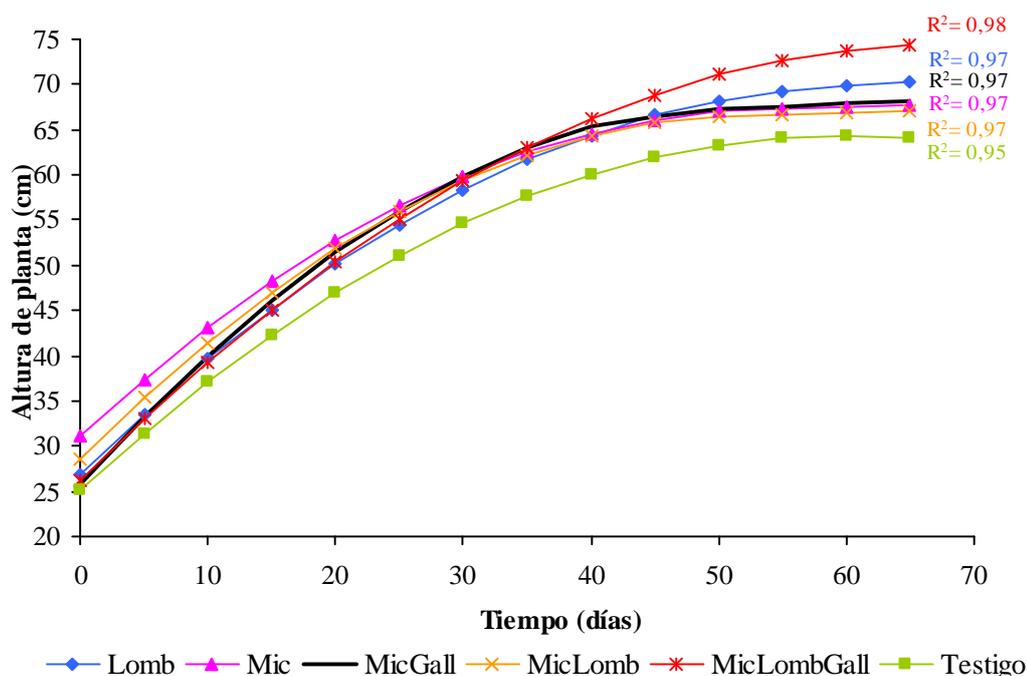


Figura 1: Curva de crecimiento de la altura de planta del cultivo de cebolla, bajo seis tratamientos de manejo de cultivo, en la comunidad La Villa del Valle Alto de Cochabamba.

Por otro lado, los tratamientos T5 (Micorrizas + humus de lombriz + gallinaza), T1 (Micorrizas) y T4 (Micorrizas + gallinaza) presentaron los mayores valores para la longitud de raíz. Sin embargo, sin diferencias significativas entre ellos. La menor

longitud de raíz se obtuvo con el tratamiento T6 (Testigo). Como se puede observar en la figura 2, las mayores longitudes de raíz se obtuvieron en los tratamientos inoculados con micorriza. Estos resultados pueden deberse a que las hifas externas del hongo micorrizico se comportan como una extensión del sistema radical de la planta [8].

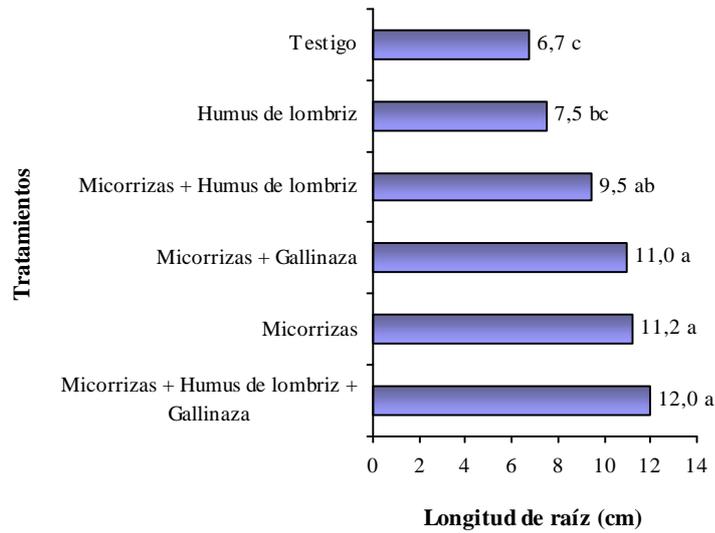


Figura 2: Efecto de tratamientos sobre la longitud de raíz del cultivo de cebolla, en la comunidad La Villa del Valle Alto de Cochabamba.

En la figura 3 se puede apreciar el desarrollo radicular alcanzado con el T5 (Micorrizas + humus de lombriz + gallinaza) observándose raíces más largas así como también mayor volumen radicular frente al T6 (Testigo).



Figura 3: Diferencias en el desarrollo radicular. T5: Micorrizas + humus de lombriz + gallinaza, T6: Testigo.

Para la variable “diámetro del tallo”, los resultados menos favorables se obtuvieron con el testigo que presentó menor diámetro de tallo. En el resto de los tratamientos se obtuvieron valores más altos respecto al testigo pero sin diferencias significativas entre sí (Figura 4).

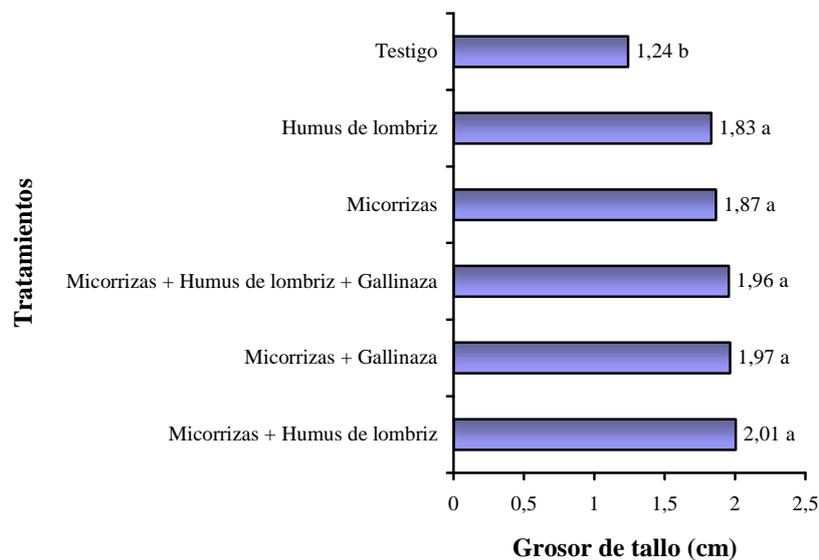


Figura 4: Efecto de tratamientos sobre el diámetro de tallo del cultivo de cebolla, en la comunidad La Villa del Valle Alto de Cochabamba.

Respecto a la calidad de los bulbos (Figura 5), el T5 (Micorrizas + humus de lombriz + gallinaza) presentó cebollas con mayor ancho de bulbo (4,7 cm), el resto de los tratamientos presentaron valores similares entre sí, con excepción del testigo que presentó bulbos más pequeños (3,6 cm). Este comportamiento puede deberse al hecho de que las micorrizas absorben con mayor eficacia y en mayor cantidad el Fósforo del suelo que otros nutrientes [14] siendo que este elemento es importante para la maduración de los bulbos [14].

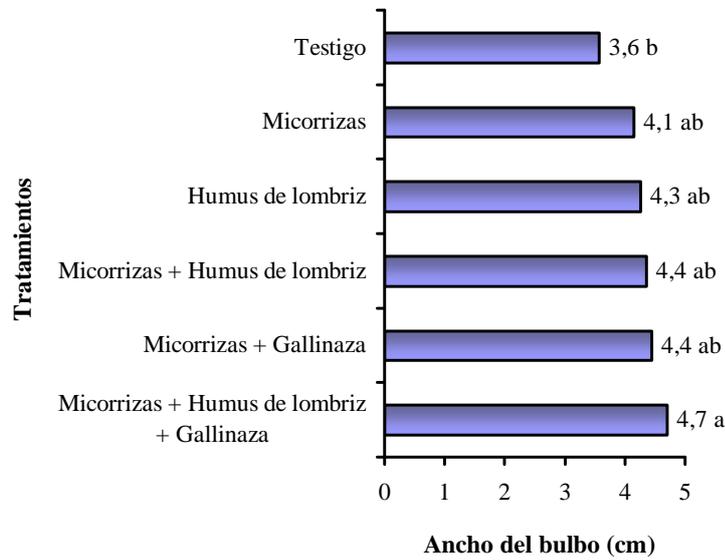


Figura 5: Efecto de tratamientos sobre el ancho del bulbo de cebolla, en la comunidad La Villa, del Valle Alto de Cochabamba.

Para la variable “número de hojas”, el menor resultado se obtuvo con el testigo (T6) que presentó en promedio 6 hojas por planta. El resto de los tratamientos presentaron mayor número de hojas por planta (cerca de 9 hojas por planta) sin diferencias estadísticamente significativas (Figura 6).

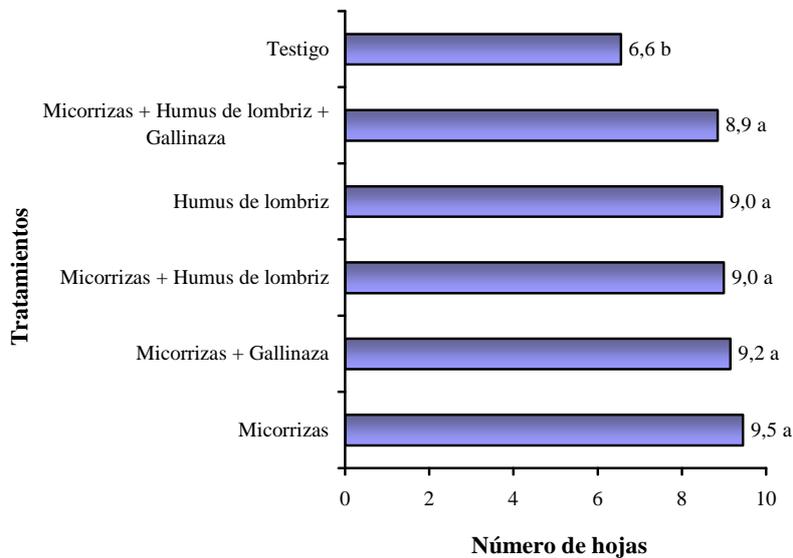


Figura 6: Efecto de tratamientos sobre el número de hojas por planta de cebolla, en la comunidad La Villa del Valle Alto de Cochabamba.

La cosecha del cultivo de cebolla se realizó con el agricultor dueño de la parcela teniendo cuidado de muestrear los surcos centrales de cada tratamiento para evitar o minimizar una posible mezcla de tratamientos. El rendimiento obtenido corresponde al bulbo más el follaje, debido a que en la zona de estudio la comercialización de la cebolla se realiza en verde.

El mayor rendimiento se obtuvo con el tratamiento T5 (micorriza + humus de lombriz + gallinaza) superando al resto de los tratamientos con un rendimiento de 100,2 t ha⁻¹. El tratamiento con resultados inferiores resultó ser el testigo con un rendimiento de 53,9 t ha⁻¹ (Figura 7). Se puede observar que los rendimientos obtenidos con los bioinsumos aplicados incrementan la producción de 20 a 50% más respecto al rendimiento obtenido con el uso de fertilizantes químicos.

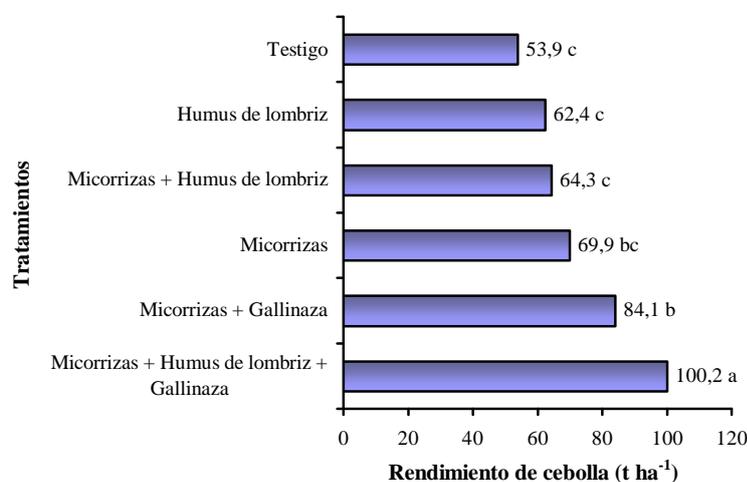


Figura 7: Efecto de tratamientos sobre el rendimiento (bulbo + follaje) del cultivo de cebolla, en la comunidad La Villa del Valle Alto de Cochabamba.

En la figura 8, se puede observar las diferencias en el volumen cosechado, los tratamientos T5 (Micorriza + humus de lombriz + gallinaza) y T4 (Micorriza + gallinaza) presentan mayor volumen cosechado, las cebollas presentan mayor longitud de hojas y bulbos mucho más grandes respecto al testigo (T6).

Tanto la frecuencia como la intensidad de colonización muestran si se está llevando a cabo la simbiosis entre el hongo y la raíz de la planta, es decir si la simbiosis se ha establecido con éxito o no. En la figura 9 se pueden observar algunas de las estructuras del hongo colonizando la raíz del cultivo de cebolla en las muestras extraídas del estudio realizado en la comunidad La Villa del Valle Alto de Cochabamba



Figura 8: Diferencias en el volumen cosechado. T4: Micorriza + gallinaza, T5: Micorrizas + humus de lombriz + gallinaza, T6: Testigo.



Figura 9: Estructuras del hongo: hifas y vesículas colonizando la raíz del cultivo de cebolla.

Todos los tratamientos donde se aplicó micorriza sola ó combinada con materia orgánica presentaron altos porcentajes de frecuencia e intensidad de colonización sin diferencias significativas entre sí (Figura 10).

Estos porcentajes demuestran la respuesta positiva de este cultivo a la inoculación de cepas comerciales (en este caso *Glomus fasciculatum*) y el éxito del establecimiento de la simbiosis. Lo que quiere decir que el cultivo de cebolla es apto para formar la simbiosis con esta micorriza en sus raíces, bajo las condiciones del estudio.

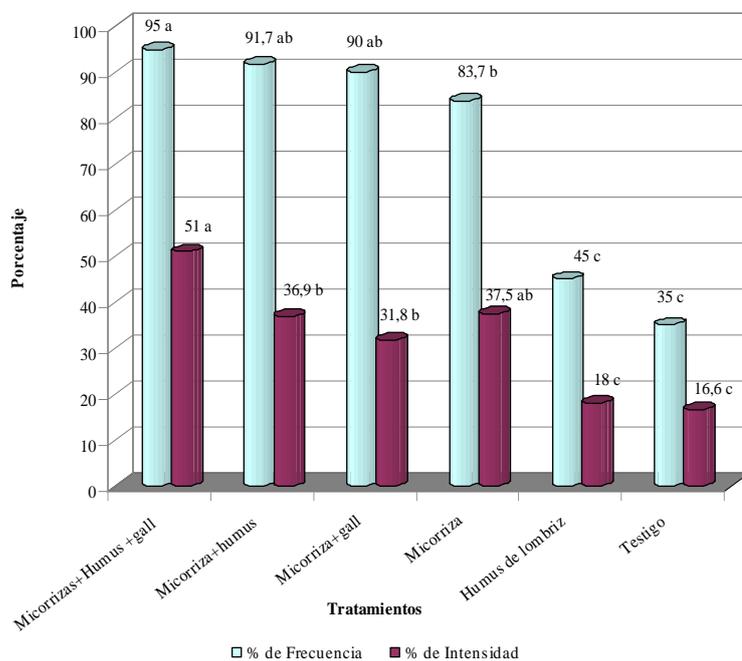


Figura 10: Frecuencia e intensidad de colonización de micorrizas en las raíces del cultivo de cebolla, en la comunidad La Villa del Valle Alto de Cochabamba

Cultivo de papa

El porcentaje de emergencia evaluado a los 45 días después de la siembra muestra en general un bajo porcentaje de emergencia (menor al 50 %) en todos los tratamientos, esto puede deberse a la calidad de semilla utilizada, ya que se utilizó una semilla producida por el propio agricultor y no así una semilla certificada (Figura 11).

Las curvas de crecimiento para la variable “altura de planta” (Figura 12) muestran que el tratamiento T5 (Micorriza + humus de lombriz + gallinaza) ofrece mejores resultados superando significativamente a todos los tratamientos, excepto en la última evaluación en la que el testigo (T6) presenta la misma altura final. Se observa también que a partir de los 85 días el crecimiento en el testigo (T6) aumenta rápidamente superando al resto de los tratamientos. Este comportamiento puede atribuirse a que el testigo recibió una segunda fertilización al momento del aporque (85 días después de la siembra), lo que favoreció el crecimiento de la altura de planta.

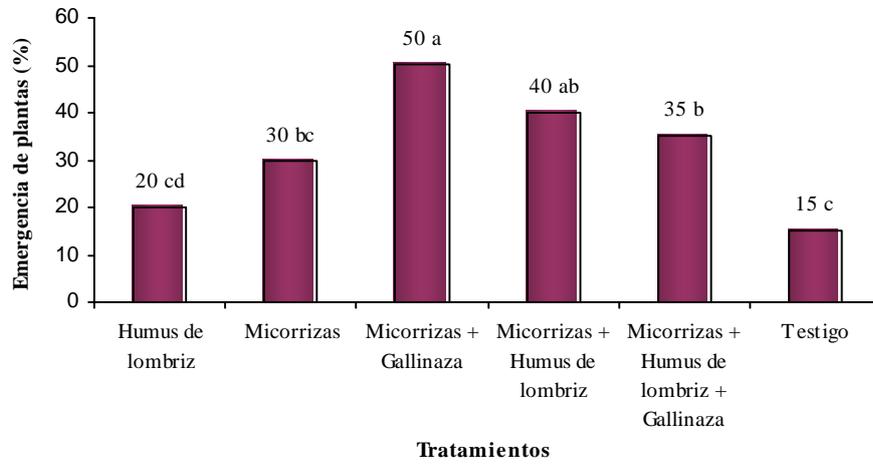


Figura 11: Efecto de tratamientos sobre el porcentaje de plantas emergidas sobre tubérculos sembrados a los 45 días después de la siembra, en la comunidad La Villa del Valle Alto de Cochabamba.

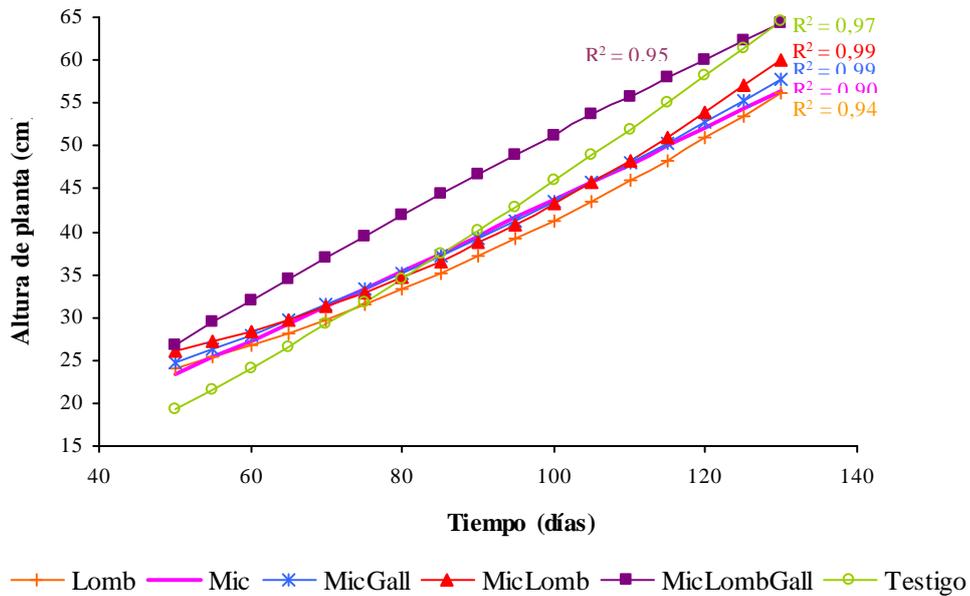


Figura 12: Curva de crecimiento de la altura de planta del cultivo de papa, bajo seis tratamientos de manejo de cultivo, en la comunidad de La Villa del Valle Alto de Cochabamba.

Respecto a la longitud de raíz, todos los tratamientos alcanzaron longitudes de raíz similares, sin diferencias significativas desde el punto de vista estadístico (Figura 13).

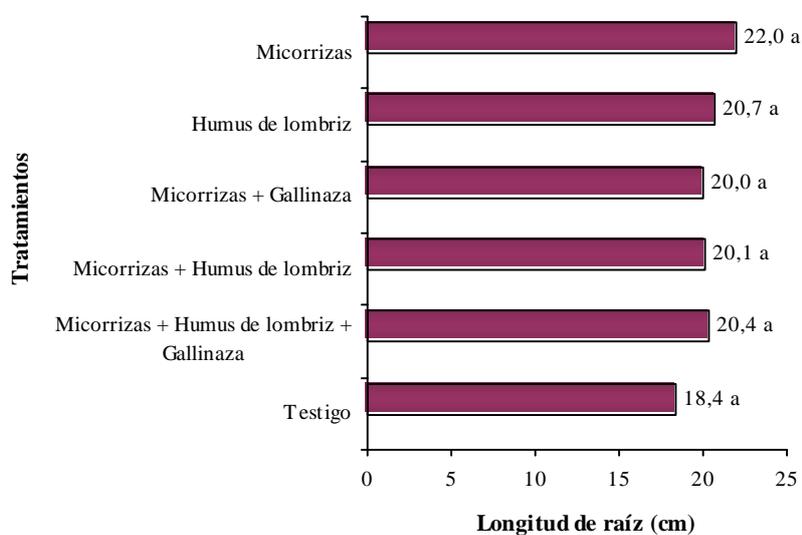


Figura 13: Efecto de tratamientos sobre la longitud de raíz del cultivo de papa, en la comunidad La Villa del Valle Alto de Cochabamba.

Al igual que en la longitud de raíz, para la variable número de tubérculos por planta no existieron diferencias significativas entre tratamientos. El número de tubérculos promedio por planta para cada tratamiento fue de 4 (Figura 14).

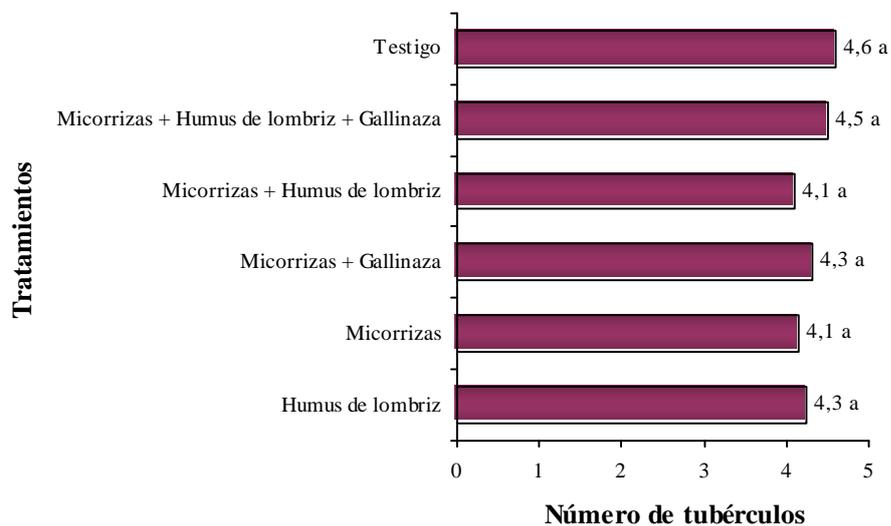


Figura 14: Efecto de los tratamientos sobre el número de tubérculos cosechados por planta en el cultivo de papa, en la comunidad La Villa del Valle Alto de Cochabamba.

Una vez realizada la cosecha de cada tratamiento se procedió a la clasificación de los tubérculos por tamaño o calibre (grande, mediano y pequeño) de acuerdo al criterio del agricultor (Figura 15).



Figura 15: Clasificación de los tubérculos en tres tamaños.

El rendimiento total (Tabla 2) muestra que el tratamiento T6 (testigo) presentó el mayor rendimiento respecto a los demás tratamientos, seguido del T3, T4, T2 y T5 respectivamente. El menor rendimiento se obtuvo con el tratamiento T1 (micorrizas).

Como se puede observar en este cultivo la aplicación de los bioinsumos utilizados no alcanzó el mismo efecto que en el cultivo de cebolla obteniéndose rendimientos menores al testigo. Sin embargo, los valores obtenidos son similares al testigo que recibió doble fertilización.

Este resultado puede atribuirse a varios factores. Entre éstos se tiene el bajo porcentaje de frecuencia e intensidad de colonización que presentaron las raíces del cultivo de papa (detallado más adelante), lo que disminuyó la efectividad de la simbiosis.

Al igual que en el cultivo de cebolla, se evaluó el porcentaje de frecuencia e intensidad de colonización de micorrizas, con el objetivo de verificar el establecimiento de la simbiosis en las raíces del cultivo de papa.

En este cultivo, el porcentaje de frecuencia e intensidad de colonización en todos los tratamientos fue inferior a la colonización obtenida en el cultivo de cebolla (Figura 16). A pesar de que la simbiosis micorrízica ha logrado establecerse en la raíz de las plantas de papa, los porcentajes de intensidad de colonización son bajos. Esto puede deberse a que la técnica de inoculación utilizada (aspersión) no es efectiva en el caso del cultivo de papa así como lo es en la cebolla. La inoculación en el cultivo de cebolla se realiza cuando la planta ya está desarrollada y sobre todo con sistema radical, lo cual permite que la colonización sea más rápida. En cambio en el cultivo de papa la aspersión

se realiza al momento de la siembra y el tiempo de germinación de la planta es muy largo (30-40 días) afectando la colonización [19].

Tabla 2. Rendimiento de papa por categoría de tubérculos

Tratamientos	Rendimiento				Total
	Tubérculos grandes	Tubérculos Medianos	(*)	Tubérculos Pequeños	
	----- <i>t ha⁻¹</i> -----				
Humus de lombriz	5,65 b	4,60	b	2,45 a	12,70 b
Micorrizas + Humus + Gallinaza	5,68 b	4,59	b	2,43 a	12,69 b
Micorrizas + Gallinaza	7,57 a	3,79	c	1,90 a	13,26 b
Micorrizas + Humus de lombriz	7,55 a	3,75	c	3,50 a	14,80 b
Testigo	7,83 a	5,40	a	2,70 a	15,93 a
Micorrizas	4,30 c	3,73	c	3,50 a	11,53 c

(*) Tratamientos con la misma letra no son significativamente diferentes a $p=0,05$ según la prueba de Tukey

Otro factor que ha podido influir es la dosis empleada de inoculante (15 kg ha^{-1}). El Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas de Cuba (INCA) ha obtenido excelente respuesta del cultivo de papa a la inoculación de micorrizas vía recubrimiento de semilla y a una dosis más elevada que llegaba al 10 % de peso de la semilla [14].

La evaluación ambiental realizada mediante la matriz interactiva de Leopold (Tabla 3) muestra que los bioinsumos utilizados generan impactos positivos altos sobre el factor suelo y sobre el desarrollo de la planta. Por otro lado, los fertilizantes químicos utilizados (urea y fosfato diamónico) generan impactos negativos considerados como leves y moderados. Estos productos presentan en su composición metales pesados especialmente Cadmio que se acumulan en el suelo [17]. El fertilizante químico fosfato diamónico (18-46-0) presenta un contenido de cadmio de 3,7 a 5,3 mg kg^{-1} de fertilizante [17]. Considerando una dosis de fertilización fosfatada de 40 kg ha^{-1} de P_2O_5 para el cultivo de cebolla [1], $220 \text{ kg de P}_2\text{O}_5$ para el cultivo de papa [9] y una rotación de cultivos de cebolla-cebolla-papa que normalmente se realiza en el Valle Alto de Cochabamba, la entrada anual de Cadmio al suelo por el uso del fertilizante fosfato diamónico (18-46-0) en el Valle alto de Cochabamba sería aproximadamente de 2,4 a 3,5 g ha^{-1} . La acumulación de cadmio en el suelo y el impacto ambiental ocasionado tienen un efecto a largo plazo por lo que se asignó una calificación de impacto negativo leve a moderado. Además, la cantidad y frecuencia de aplicación de este fertilizante en la zona de estudio todavía no es elevada.

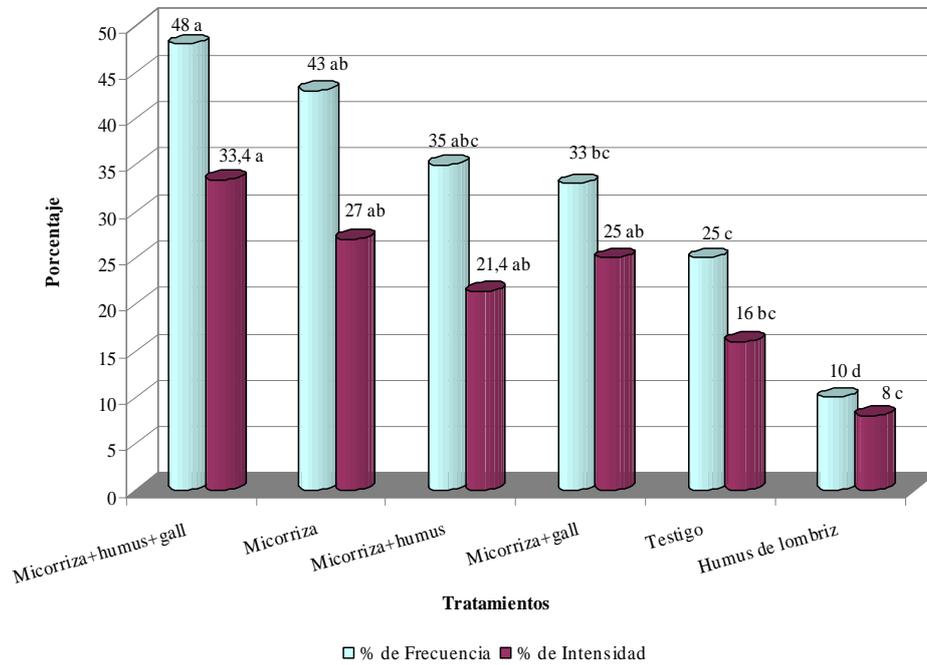


Figura 16: Frecuencia e intensidad de colonización de micorrizas en las raíces del cultivo de papa, en la comunidad La Villa del Valle Alto de Cochabamba.

Tabla 3. Matriz de identificación de impactos ambientales para la etapa de fertilización, comunidad La Villa del Valle Alto de Cochabamba.

PONDERACIÓN DE LOS IMPACTOS:	ACCIONES	Etapa de Fertilización				
		Micorrizas	Humus de lombriz	Micorriza+humus+gallinaza	Urea	Fosfato diamónico
-3 Impacto Negativo Crítico						
-2 Impacto Negativo Severo						
-1 Impacto Negativo Moderado						
0 Impacto Negativo Leve						
1 Impacto Positivo Alto						
2 Impacto Positivo Moderado						
FACTORES AFECTADOS						
CARACT. FÍSICAS Y QUÍMICAS						
1. SUELO						
Acumulación de residuos tóxicos						0
Microbiología del suelo		1	1	1	2	2

Cambio de propiedades físicas		1	1	1		
Cambio propiedades químicas			1	1	2	2
2. AGUA						
Superficiales (contaminación)					0	0
Subterráneas					-1	0
3. ATMÓSFERA						
Calidad del aire					0	0
CONDICIONES BIOLÓGICAS						
1. FLORA						
Desarrollo de la planta		1	1	1	2	2
Cosecha		1	1	1	2	2
2. FAUNA						
Fauna acuática					0	0
FACTORES CULTURALES						
Salud y seguridad					-3	-3
RELACIONES ECOLÓGICAS						
Salinización del recurso agua					-3	-3
Salinización del suelo					-2	-2

Modificado de CEDARENA *et al.*, 2005

El análisis económico del cultivo de cebolla muestra que el T5 presenta el mayor costo total; sin embargo es el tratamiento que presentó también mayor beneficio económico, comparado con el testigo. Se observa que si el agricultor aumenta 275 Bs más, éste percibe el doble de beneficios que utilizando fertilizantes químicos. Los tratamientos T1, T2 y T3 representan también alternativas viables para los agricultores al presentar mayor beneficio con menores costos de producción (Figura 17).

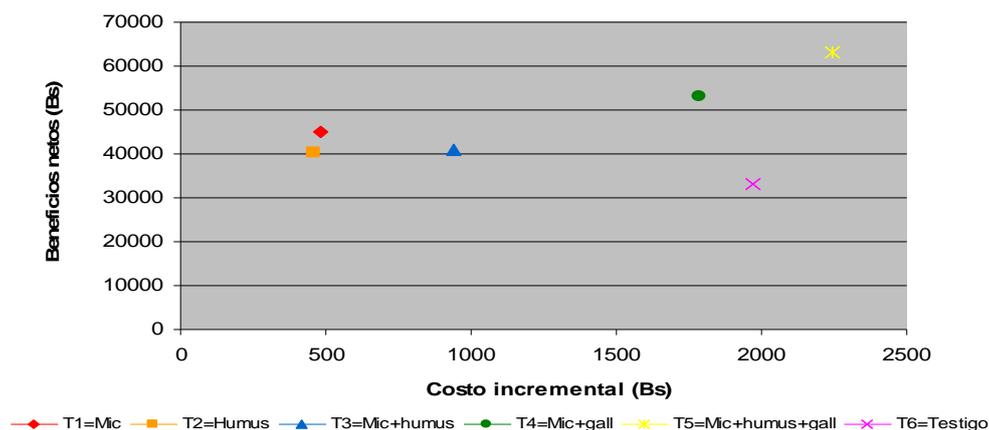


Figura 17: Gráfica de beneficios netos y costo incremental del cultivo de cebolla.

En el cultivo de papa el tratamiento T3 presentó mayor beneficio neto, seguido del T2 y T4. Posteriormente se tiene al tratamiento T6 (Testigo) con 9.587,1 Bs ha⁻¹. Este tratamiento alcanzó mayor rendimiento, sin embargo presenta un beneficio neto bajo debido a los altos costos de los fertilizantes químicos (Figura 18).

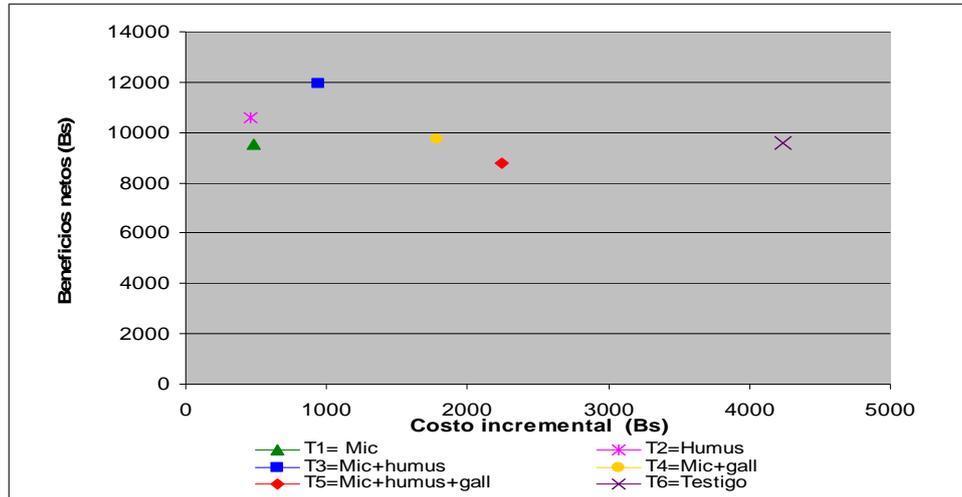


Figura 18: Gráfica de beneficios netos y costo incremental del cultivo de cebolla.

5 Conclusiones

Los plantas inoculados con micorriza en combinación con humus de lombriz y gallinaza (T3, T4, T5) evaluados en el cultivo de cebolla, permitieron la obtención de altos rendimientos y un mayor desarrollo de la planta (mayor altura de planta, mayor diámetro de bulbo, mayor desarrollo radical, mayor vigor y mayor sanidad de las plantas) en ausencia de fertilizantes químicos.

En el cultivo de papa, la influencia de estos tratamientos sobre la producción y calidad del cultivo ha sido menos marcada que en la cebolla. Sin embargo, los rendimientos obtenidos, así como también el desarrollo morfológico fueron similares al testigo (T6), que recibió doble fertilización mineral.

El uso de microorganismos benéficos y abonos orgánicos (humus de lombriz y gallinaza) en la etapa de fertilización no presentan impactos negativos a la salud y al medio ambiente; por el contrario, existen estudios que sugieren la presencia de impactos positivos sobre el suelo y desarrollo de los cultivos. Los fertilizantes químicos (urea y fosfato diamónico) presentan impactos negativos leves y moderados sobre la salud humana y el medio ambiente, porque en la zona de estudio la frecuencia y dosis de aplicación de estos productos es moderada.

El tratamiento con mayor beneficio neto en el cultivo de cebolla fue el T5 (micorriza + humus de lombriz + gallinaza) con 63.102,83 Bs ha⁻¹. Este tratamiento presentó el mayor costo total frente a los demás tratamientos pero debido al alto rendimiento obtenido los beneficios fueron mayores. En el cultivo de papa, el mayor

beneficio neto se obtuvo con el tratamiento T3 (micorrizas + humus de lombriz), T2 (Humus de lombriz) y T1 (micorrizas) respectivamente. Estos tratamientos presentaron también menor costo total frente a los demás tratamientos.

El uso de nuevas alternativas, como la utilización de micorrizas combinadas con materia orgánica, constituye una buena opción para reducir el uso de productos químicos y transformar los sistemas agrícolas en formas de producción más sostenibles desde el punto de vista productivo, ecológico, económico y social.

Referencias

- [1] Andrade, R. 2005. *Cultivo de cebolla* (Allium cepa). Boletín técnico Edición No 3. Ministerio de Asuntos Campesinos y Agropecuarios, Bolivia.
- [2] Benzing, A. 2001. *Agricultura orgánica: fundamentos para la región andina*. Editorial Neckar- Verlag, Alemania.
- [3] CEDARENA (Centro de derecho ambiental y recursos naturales), CINPE (Centro Internacional de política económica para el desarrollo sostenible), Universidad de Miami, UDSMA (Unidad de desarrollo sostenible y medio ambiente de la OEA). *Evaluación del Impacto Ambiental y de Capacidad Institucional de la Región Centroamericana Frente a la Liberalización Comercial: Estudios de caso de Costa Rica y Guatemala*. En http://www.oas.org/dsd/EnvironmentLaw/trade/Documents/costa_rica/impacto_ambiental_y_liberalizacion_comercial_07-04.pdf. (Verificado en Junio 2006).
- [4] Crespo, F.; Bellot, S. *La agricultura, sostén de la Economía*. En <http://www.nuevaeconomia.com.bo/docs/05agrop.pdf>. (Verificado en Marzo 2005).
- [5] Dalence J. S. 1999. *Fuentes de polución difusa y grado de contaminación por nitratos en los suelos agrícolas en el abanico de Punata*. Tesis Maestría Profesional en "Información de Suelos para el Manejo de los Recursos Naturales". Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba.
- [6] FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). *Consumo de fertilizantes*. En <http://www.fao.org>. (Verificado en Marzo 2005).
- [7] FAOSTAT (Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistics). Database Online. En <http://faostat.fao.org/faostat/collections>. (Verificado en Agosto 2005).
- [8] López, C. *Identificación de micorrizas arbusculares en cultivos de mora (Rubus Glaucus), en diez localidades de seis municipios del departamento de Boyacá*. Proyecto de Grado para optar al Título de Licenciada en Biología, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia. En <http://www.pronatta.gov.co/proyectos/ficha.php?ficha=201151185-18k>. (Verificado en Abril 2005).
- [9] Moltaldo, A. 1984. *Cultivo y mejoramiento de la papa*. Ed. IICA, San José.
- [10] Montgomery, D. 2003. *Diseño y análisis de experimentos*. Limusa Wiley. México.

- [11] Phillips, J. M.; Hayman, D. S. 1970. *Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection*. Transactions British Mycological Society. Vol. 55.
- [12] Pritchell, W. 1990. *Suelos Forestales*. Limusa, México.
- [13] PROSUKO. 2003. *La tecnología de Suka Kollus en el altiplano*. Propuesta técnica. COSUDE – SECO, La Paz.
- [14] Rivera, R; Fernández, F; Hernández, A.; Martín, J. R. 2003. *El manejo eficiente de la simbiosis micorrízica, una vía hacia la agricultura sostenible Estudio de caso: El Caribe*. Ediciones INCA, Cuba.
- [15] Steel, R.; Torrie, J. 1980. *Bioestadística: Principios y Procedimientos*. McGraw-Hill. México.
- [16] Van Haeff, J.N. 1991. *Horticultura*. TRILLAS. México.
- [17] Villanueva, L. 2001. *Evaluación del impacto de los fertilizantes fosfatados en la acumulación de cadmio en suelos cultivados con maíz*. Tesis para optar al Grado de Magíster en Gestión y Planificación Ambiental, Universidad de Chile, Santiago – Chile. En <http://www.mgpa.uchile.cl/documentos/villanueval.pdf>. (Verificado en 15/10/2005).
- [18] Xoconostle, B.; Medrano, R. *Impacto de la biotecnología agrícola en cultivos: el caso de las micorrizas*. En <http://www.cinvestav.mx/publicaciones/awayper/sepoct02/>. (Verificado en Abril 2005).

Entrevistas correo-electrónico

- [19] Rivera R. A. (rrivera@inca.edu.cu). 2006. "Consulta sobre impactos negativos de las micorrizas". Junio