

Efecto de la labranza y fertilización nitrogenada en los cultivos de fréjol y maíz sobre indicadores biológicos de la calidad de un suelo andino del Ecuador

Effect of tillage and nitrogen fertilization in bean and corn crops on biological indicators of the quality of an Andean soil of Ecuador

Leyda Llanga¹, María Eugenia Avila-Salem², Fabián Montesdeoca³, Humberto Aponte⁴, Lenin Ron-Garrido⁵, José Espinosa⁶, Marco Rivera⁶, Fernando Borie⁷, Pablo Cornejo⁸, Soraya Alvarado Ochoa⁹



Siembra 10 (1) (2023): e4261

Recibido: 07/12/2022 Revisado: 20/01/2023 Aceptado: 30/01/2023

- ¹ Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ciencias Agrícolas. Jerónimo Leiton y Gatto Sobral S/N. Ciudadela Universitaria. 170521. Quito, Pichincha, Ecuador.
✉ leyda_1116@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-3792-9644>
- ² Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ciencias Agrícolas. Jerónimo Leiton y Gatto Sobral S/N. Ciudadela Universitaria. 170521. Quito, Pichincha, Ecuador.
✉ mavila@uce.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-8511-4231>
- ³ Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ciencias Agrícolas. Jerónimo Leiton y Gatto Sobral S/N. Ciudadela Universitaria. 170521. Quito, Pichincha, Ecuador.
✉ fmontesdeoca@uce.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-8822-492X>
- ⁴ Universidad de O'Higgins, Institute of Agri-Food, Animal and Environmental Sciences (ICA3), Laboratory of Soil Microbial Ecology and Biogeochemistry, San Fernando, Chile.
✉ humberto.aponte@uoh.cl
<https://orcid.org/0000-0003-2218-4712>
- ⁵ Universidad Central del Ecuador. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Jerónimo Leiton y Gatto Sobral. 170129. Quito, Ecuador.
✉ lron@uce.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-9021-4376>
- ⁶ Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ciencias Agrícolas. Jerónimo Leiton y Gatto Sobral S/N. Ciudadela Universitaria. 170521. Quito, Pichincha, Ecuador.
✉ jespinos@fragaria.com.ec mrivera@uce.edu.ec
- ⁷ Universidad de La Frontera. Scientific and Technological Bioresource Nucleus (BIOREN). Avenida Francisco Salazar 01145. Casilla 54-D. Temuco, Chile.
✉ fborie@uct.cl
- Universidad Católica de Temuco. Facultad de Recursos Naturales. Chile. Manuel Montt 56, Temuco Campus San Francisco. Temuco, Chile.
✉ fborie@uct.cl
- ⁸ Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Facultad de Ciencias Agronómicas y de los Alimentos. Escuela de Agronomía. Quilota 2260-000. Valparaíso, Chile.
✉ pablo.cornejo@pucv.cl
<https://orcid.org/0000-0003-2124-3100>
- ⁹ Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ciencias Agrícolas. Jerónimo Leiton y Gatto Sobral S/N. Ciudadela Universitaria. 170521. Quito, Pichincha, Ecuador.
✉ spalvarado@uce.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-4710-8281>

*Autor de correspondencia: mavila@uce.edu.ec

SIEMBRA

<https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/SIEMBRA>

ISSN-e: 2477-8850

ISSN: 1390-8928

Periodicidad: semestral

vol. 10, núm 1, 2023

siembra.fag@uce.edu.ec

DOI: <https://doi.org/10.29166/siembra.v10i1.4261>



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial

Resumen

Los parámetros biológicos son usados como indicadores tempranos en la calidad de un suelo (ICS) agrícola, ya que responden rápidamente al manejo antrópico. El objetivo de esta investigación fue determinar el efecto del sistema de labranza: siembra directa (SD) y labranza convencional (LC), y de la fertilización nitrogenada después de los cultivos de fréjol y maíz, sobre ciertos indicadores biológicos de la calidad del suelo. El estudio se realizó sobre un molisol de la región andina del Ecuador. Se determinó la biomasa microbiana (BM), respiración microbiana (RM), y actividad enzimática (fosfatasa ácida, hidrólisis de la fluoresceína-diacetato [FDA], y β -glucosidasa [β -G]). Los resultados mostraron que la fosfatasa presentó la mayor actividad bajo LC, la FDA respondió al efecto de los niveles altos de nitrógeno (N), la actividad de la enzima β -G fue mayor en LC. Adicionalmente, el análisis de componentes principales seleccionó a los indicadores biológicos estudiados, como ICS. Se concluye que los indicadores biológicos del suelo fueron afectados por las prácticas de manejo estudiadas.

Palabras clave: siembra directa, actividad enzimática, biomasa microbiana, respiración microbiana, fosfatasa ácida.

Abstract

Biological parameters are used as early indicators of the quality of an agricultural soil (ICS), due to their quick response to the anthropic soil management. The main objective of this research was to determine the effect of the tillage system: no-till (SD) and conventional tillage (LC), and to the nitrogen fertilization in bean and corn crop on certain biological indicators of soil quality. The study was carried out on a mollisol from the Andean region of Ecuador. Microbial biomass (MB), microbial respiration (RM), and enzyme activity (acid phosphatase, hydrolysis of fluorescein diacetate [FDA], and β -glucosidase [β -G]) were determined. The results showed that the phosphatase presented the highest activity under LC, the FDA responded to the effect of high nitrogen levels application (N), the activity of the β -G enzyme was higher under LC. Additionally, the principal component analysis selected these biological

indicators studied as ICS. It is concluded that the biological indicators of the soil were affected by the management practices studied.

Keywords: direct sowing, enzymatic activity, microbial biomass, microbial respiration, acid phosphatase.

1. Introducción

El suelo es un recurso no renovable, dinámico y multifuncional, en el cual coexisten plantas, animales, macro y microorganismos. Sin embargo, las continuas prácticas de manejo a las cuales se le ha sometido, con la finalidad de incrementar el rendimiento de los cultivos, han provocado cambios en sus características físicas, químicas y biológicas a través del tiempo (Moreno et al., 2015; Zhong et al., 2023). Alrededor del 33 % del suelo a nivel mundial se encuentra –de moderado a altamente– degradado debido a la erosión, salinización, compactación, acidificación y contaminación, resultado de actividades humanas, tales como la agricultura, expansión de la frontera agrícola, sobrepastoreo, deforestación, entre otros (FAO, 2015).

En el Ecuador, factores climáticos y antrópicos han favorecido la pérdida del suelo productivo. Se estima que alrededor del 47 % de los suelos del Ecuador tienen problemas de degradación y que, se pierde aproximadamente entre 30 a 50 t de suelo por hectárea y por año (Suquilanda, 2008). En la provincia de Pichincha alrededor del 11 % de los suelos se ven afectados por procesos erosivos (Ministerio del Ambiente, 2014).

Entre las prácticas de manejo que han afectado al suelo agrícola figuran: el sistema de labranza (Boada y Espinosa, 2016), el monocultivo, el uso excesivo de fertilizantes y el escaso o nulo aporte de residuos vegetales y animales al suelo (Castillo et al., 2022; Vidal et al., 1997). El empleo intensivo de labranza convencional [LC], que consiste en voltear el suelo con el uso de maquinaria agrícola, tiene como ventajas el aflojar, mezclar y airear el suelo, y es además, un método eficaz de control de malezas. Sin embargo, el invertir total o parcialmente la capa arable del suelo, afecta su estructura (suceden cambios en el tamaño y estabilidad de los agregados), promueve su compactación, disminuye la capacidad de retención de humedad y la disponibilidad de nutrientes (Galantini et al., 2006). Además, el constante movimiento del suelo oxida rápidamente la materia orgánica del suelo [MOS], disminuyendo el contenido de carbono orgánico [CO] (Alvarado Ochoa, 2008; Galantini y Suñer, 2008).

Los cambios en los atributos físicos y químicos propios del suelo aceleran su degradación provocando balances negativos en la reserva nutritiva para plantas y microorganismos (Ávila-Salem et al., 2020), por lo tanto, la reducción de la actividad microbiana y la consecuente baja tasa de descomposición, la transformación de la MOS y la disminución en el reciclaje de nutrientes (Álvarez et al., 2008). La LC y el monocultivo contribuyen a la baja disponibilidad de nutrientes, entre estos el nitrógeno (N), creando así una dependencia de fertilizantes sintéticos en elevadas cantidades y promoviendo la contaminación de suelo y agua, lo que reduce la actividad microbiana y eleva el costo de producción de los cultivos (Echeverría y Sainz Rozas, 2001; García, 2003; Soria-Idrobo, 2008).

En contraste, la siembra directa [SD] es una forma de manejo en la que no se remueve el suelo, y se deja al menos el 30 % de los residuos del cultivo anterior generando un manto que protege el suelo de la erosión. Cuando la SD se combina con otras prácticas conservacionistas, tales como el aporte de abonos orgánicos, empleo de abonos verdes, encalado, manejo integral de nutrientes, asociación y rotación de cultivos, las propiedades físicas, químicas y biológicas se modifican a mediano y largo plazo. Bajo SD se reduce la pérdida de humedad del suelo (Montesdeoca et al., 2020), además, al dejar los residuos del cultivo anterior sobre el suelo, se incrementa la actividad microbiana y se modifica el contenido y la calidad de la MOS (Schmidt y Amiotti, 2017; Suquilanda, 2008).

La calidad del suelo se mide por indicadores que son variables físicas, químicas y biológicas; y permiten medir cuantitativa o cualitativamente cambios que suceden en el suelo a corto, mediano o largo plazo (Dudek et al., 2022; Jamiy Orozco et al., 2015; Rojas et al., 2016). Entre los indicadores más estudiados están: la textura, humedad, estabilidad de agregados, densidad aparente, velocidad de infiltración del agua, MOS, CO, materia orgánica particulada [MOP], conductividad eléctrica [CE], N mineralizado, pH, carbono [C] y N de la biomasa microbiana [BM], respiración microbiana [RM] el adenosín trifosfato [ATP], actividad enzimática (deshidrogenasa, catalasa, ureasa, proteasa, fosfatasa, β -glucosidasa, fluoresceína diacetato [FDA]) (Cantú et al., 2007; Henríquez et al., 2014) y glomalina (Ávila-Salem et al., 2020).

Los indicadores biológicos, considerados indicadores tempranos, presentan elevada sensibilidad, son dinámicos y responden rápido al manejo del suelo agrícola (Bagnall *et al.*, 2023). La BM interviene en la mineralización de la MO, proceso durante el cual se sintetizan y secretan aminoácidos, proteínas, aminoazúcares (por ejemplo, la glucosamina) (García y Rivero, 2012). Además, participan en los ciclos de los nutrientes donde las enzimas son indispensables, por ejemplo, las carbohidrasas, quitinasas y β -glucosidasa intervienen en el ciclo del C, la fosfatasa en el ciclo del fósforo [P], la ureasa y proteasa en el ciclo del N, y la arilsulfatasa en el ciclo del azufre [S]. Las esterases, como proteasas y lipasas, están implicadas en la descomposición de tejidos vegetales en el suelo, participando así en la dinámica de la MOS, y cuya actividad se mide a través de la hidrólisis de la FDA (Henríquez *et al.*, 2014; Navas *et al.*, 2009).

Por lo que antecede, y considerando la gran importancia del componente biológico en la calidad del suelo, la presente investigación evaluó el efecto del manejo agronómico sobre indicadores biológicos de la calidad de un suelo agrícola de la sierra ecuatoriana.

2. Materiales y Métodos

2.1. Descripción del sitio

La investigación se desarrolló en el Laboratorio de Química Agrícola y Suelos [LQAS] de la Facultad de Ciencias Agrícolas [FCAg], Universidad Central del Ecuador [UCE]. Las muestras se obtuvieron de un estudio a largo plazo, ubicado en el Lote 4.2 del Campo Académico Docente Experimental “La Tola” [CADET], de la UCE. El sitio está ubicado en el sector “La Morita” de la parroquia Tumbaco, cantón Quito, perteneciente a la provincia de Pichincha, el cual se encuentra a una altitud de 2.465 m s.n.m., a 78°21'18" de longitud oeste y 00°13'49" de latitud sur. La precipitación media anual reportada es de 868 mm, temperatura de 17 °C y humedad relativa de 73,9 %. El suelo del sitio fue clasificado como Entic Durustolls (Moreno *et al.*, 2017).

2.2. Muestreo de suelo

Al finalizar el ciclo de cada cultivo: fréjol (octubre, 2016) y maíz (marzo, 2018), se tomó una muestra compuesta de suelo de aproximadamente 1 kg de cada tratamiento, misma que se obtuvo a partir de cinco submuestras aleatorias en cada una de las subparcelas, a una profundidad de 0-20 cm. Posteriormente, se homogenizó y se colocó en fundas herméticamente cerradas y debidamente etiquetadas para ser transportadas en un enfriador con hielo, hasta los laboratorios. Las muestras se conservaron en congelación a una temperatura de -20 °C hasta la realización de los análisis correspondientes.

2.3. Determinaciones biológicas del suelo

En el LQAS, de la FCAg-UCCE, se procedió a realizar el análisis de las muestras en estudio con las metodologías descritas para las variables físicas, químicas y biológicas seleccionadas para la presente investigación.

La BM se determinó en laboratorio con el método fumigación-incubación. Los datos obtenidos se expresaron en mg C-CO₂ g⁻¹ suelo seco (Bottomley *et al.*, 2018). La RM, se determinó en mg C-CO₂ g⁻¹ suelo. Para el efecto, las muestras se introdujeron en frascos de vidrio con tapa hermética, se ajustó la humedad y posteriormente se incubaron las muestras por 4 días a 27 °C. El CO₂ generado se recogió en una solución de NaOH (Ristow *et al.*, 2017). Para determinar la fosfatasa ácida, se utilizó p-nitrofenilfosfato como sustrato de la reacción, el cual se determinó utilizando espectrofotómetro a 400 nm de longitud de onda. La actividad de la enzima se expresó como μg de p-nitrofenilfosfato g⁻¹ h⁻¹ (Paolini Gómez, 2016). Para el caso de la β -G, el suelo reaccionó con p-nitrofenil- β -glucopiranosido, y se midió el contenido del p-nitrofenol liberado en el espectrofotómetro a 420 nm de longitud de onda. La actividad de la enzima se expresó en μg p-NF g⁻¹ h⁻¹ (Paolini Gómez, 2010a). Finalmente, para el caso de la determinación de la FDA, se utilizó el método basado en el clivaje hidrolítico del FDA a fluoresceína por lipasas; después se incubó 2 g de suelo a 30 °C por 30 minutos a baño María con una solución de 1.000 μg ml⁻¹ de FDA, se midió el filtrado en espectrofotómetro a 490 nm de longitud de onda. Los resultados de la actividad de la enzima se expresaron como μg de fluoresceína g⁻¹ de suelo seco h⁻¹ (Paolini Gómez, 2010b).

2.4. Análisis estadístico

Los factores en estudio son los sistemas de labranza [SL] (**SD**: siembra directa **LC**: labranza convencional), niveles de fertilización nitrogenada [NN] (**N0**: 0 %, **N1**: 50 %, **N2**: 100 % y **N3**: 150 %) y cultivos [CC] (**C1**: fréjol, **C2**: maíz). Con respecto a los niveles, estos se establecieron con base en la recomendación de fertilización del cultivo (fréjol y maíz) (Tabla 1), efectuada por el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias [INIAP]. N2 corresponde al nivel de 100 % y representa la fertilización normal.

Tabla 1. Dosis y fuente de fertilización en el cultivo de fréjol y maíz.
Table 1. Dose and source of beans and corn crops fertilization.

Cultivo	Fuente	Nivel de N (kg ha ⁻¹)			
		N0	N1	N2	N3
Fréjol	Urea/DAP	0	11	22	33
Maíz	Nitrato de amonio	0	40	80	120

Los datos obtenidos se analizaron bajo un diseño Crossover para el factor niveles de N con anidamiento en los factores sistema de labranza y cultivo.

Se comprobó la normalidad de las variables (prueba de Shapiro-Wilk) y se realizó el análisis de varianza (ADEVA). Para la separación de medias de los tratamientos, se utilizó la prueba DMS al 5 %. Además, se realizó el análisis de correlación de Pearson de las variables en estudio. Adicionalmente, se desarrolló el análisis de componentes principales [ACP] con la finalidad de describir la correlación de las variables en estudio de los factores cualitativos, como el SL y el cultivo; identificando cuáles describen mejor el manejo sostenible de la calidad del suelo. Para el análisis estadístico se utilizó el programa R, versión 3.6.1 (R Core Team, 2019).

3. Resultados y Discusión

Los resultados indicaron diferencias significativas para BM, RM, fosfatasa **ácida**, FDA y **β-G**, tanto en los factores principales como en las interacciones (Tabla 2).

Tabla 2. ADEVA para las variables biológicas en el efecto de la labranza, fertilización nitrogenada en los cultivos de fréjol y maíz sobre indicadores biológicos de la calidad de un suelo andino del Ecuador.

Table 2. ADEVA for biological variables on the effect of tillage, nitrogen fertilization in bean and corn crops on biological indicators of the quality of an Andean soil in Ecuador.

Variables biológicas (actividad microbiana y enzimática)						
F.V.	G. L.	Cuadrados medios				
		BM, mg C-CO ₂ g ⁻¹ suelo seco	RM, mg C-CO ₂ g ⁻¹ suelo seco	Fosfatasa, μg de p-nitrofenilfosfato g ⁻¹ h ⁻¹	FDA, μg de fluoresceína g ⁻¹ h ⁻¹	β-G, μg p-NF g ⁻¹ h ⁻¹
Sistema de labranza (SL)	1	0,20977*	0,0008821 ^{ns}	141.546**	693,1 ^{ns}	2.159,3 ^{ns}
Niveles de nitrógeno (NN)	3	0,02253 ^{ns}	0,0091162*	6.784 ^{ns}	6.035,9**	12.217,2**
Cultivo (CC)	1	0,03783 ^{ns}	0,0030392 ^{ns}	6.905 ^{ns}	280,8 ^{ns}	729,3 ^{ns}
SL*NN	3	0,07655 ^{ns}	0,0015510 ^{ns}	9.425**	370,6 ^{ns}	1.446,7 ^{ns}
SL*CC	1	0,37438 ^{ns}	0,0000070 ^{ns}	213.766**	1.594,9 ^{ns}	1.409,7 ^{ns}
NN*CC	3	0,01373 ^{ns}	0,0030272 ^{ns}	6.910 ^{ns}	3.437,0**	7.684,8**
SL*NN*CC	3	0,10201*	0,0003887 ^{ns}	8.071**	401,0 ^{ns}	1.338,6**
C.V. (%)		14	24	22	23	28
Media		1,55	0,29	355,5	134,4	207,5

C.V. = Coeficiente de variación

ns = No significativo

* = Diferencia estadística significativa $p < 0,05$

** = Diferencia estadística significativa $p < 0,01$

3.1. Biomasa microbiana

El tratamiento LCN2C1 registró el mayor promedio de BM con 1,85 mg C-CO₂ g⁻¹ suelo seco, mientras que LCN1C2 mostró el promedio más bajo con 1,13 mg C-CO₂ g⁻¹ suelo seco (Figura 1). Estos resultados permiten inferir que la BM se incrementa bajo LC y el nivel óptimo de fertilización nitrogenada en el cultivo fréjol, mientras que cuando se utilizan niveles más altos o bajos de N recomendado en el cultivo de maíz, existe menor BM. Zagal y Córdova (2005), al evaluar sistemas de rotación maíz-trigo-praderas con fertilización nitrogenada en un Andisol en Chile, Centro Regional de Investigación Quilamapu {INIA}, no encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados en cuanto al C de la BM. Por su parte, Ferreras et al. (2009), en un estudio sobre un Argiudol típico de Argentina reportaron que la BM fue sensible al manejo; los valores obtenidos fueron 130, 149, 164, 216 y 243 µg C-CO₂ g⁻¹ para los tratamientos con SD bajo fertilización utilizada por los agricultores, SD bajo fertilización doble, SD cultivo de cobertera antes del cultivo y un suelo con LC, respectivamente.

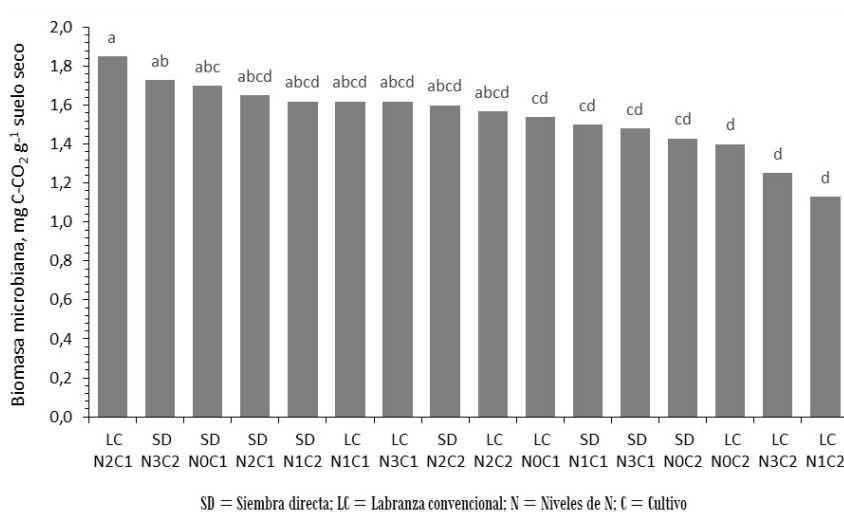


Figura 1. Variación en la biomasa microbiana, por efecto de la labranza, fertilización nitrogenada en los cultivos de fréjol y maíz sobre indicadores biológicos de la calidad de un suelo andino del Ecuador.

Figure 1. Variation in microbial biomass, due to the effect of tillage, nitrogen fertilization in bean and corn crops on biological indicators of the quality of Andean soil in Ecuador.

3.2. Respiración microbiana

El efecto principal de los niveles de N (Figura 2) sobre la RM fue observado con el promedio más alto asociado con N0 (0,33 mg C-CO₂ g⁻¹ suelo seco) y el más bajo con N1 (0,24 mg C-CO₂ g⁻¹ suelo seco). Con estos resultados se puede inferir que cuando se emplea fertilización nitrogenada, la RM se reduce posiblemente porque el aporte de N promueve la mineralización de la MOS y reduce las fuentes carbonadas presentes en el suelo para su aprovechamiento por parte de los microorganismos. Estos resultados contradicen a lo expuesto por Terumi Sanomiya et al. (2006), quienes al evaluar la RM en un alfisol (Brasil) al que se aplicó 60 kg N ha⁻¹ frente a un testigo y sin fertilizante nitrogenado, no encontraron diferencias significativas entre los tratamientos estudiados. Sin embargo, las diferencias numéricas entre el suelo fertilizado y sin fertilizar fueron de 64 y 68 mg C-CO₂ g⁻¹ suelo seco, respectivamente.

Toledo et al. (2013) por su parte, al estudiar en el departamento de Oberá, provincia de Misiones, un Oxisol bajo selva (presencia de gran variedad de árboles de gran porte, abundancia de lianas y plantas epifitas y sin perturbación antrópica, cultivo de maíz bajo monocultivo por 7 años, sin fertilización ni residuos orgánicos y LC; y cultivo de té con fertilización nitrogenada cada año, mecanización para la cosecha y sin aplicación de enmiendas orgánicas; determinaron que la RM *in situ* fue mayor en el cultivo de maíz, después en selva y finalmente en cultivo de té con valores de 65 y 26 kg C-CO₂ ha⁻¹ día⁻¹; respectivamente. El cultivo de té con fertilización nitrogenada obtuvo el menor promedio de RM.

3.3. Fosfatasa ácida

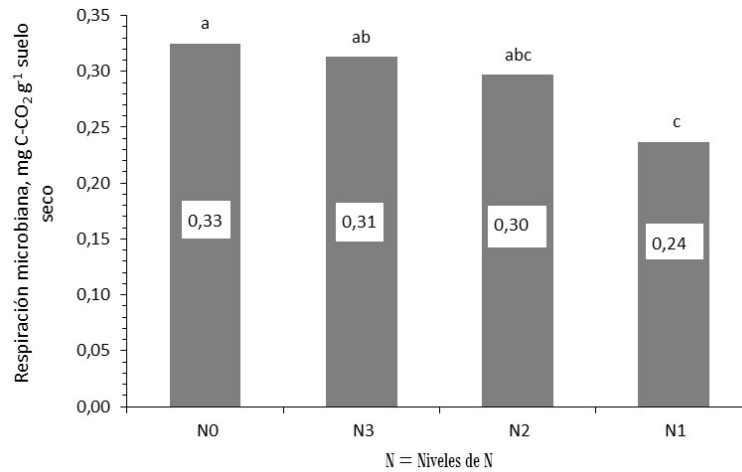


Figura 2. Variación en la respiración microbiana por efecto de la labranza, fertilización nitrogenada en los cultivos de fréjol y maíz sobre indicadores biológicos de la calidad de un suelo andino del Ecuador.

Figure 2. Variation in microbial respiration due to the effect of tillage, nitrogen fertilization in bean and corn crops on biological indicators of the quality of Andean soil in Ecuador.

La actividad de la enzima fosfatasa ácida (Figura 3) respondió al manejo bajo SL, NN y cultivo. Con estos resultados se puede argumentar que bajo LC se incrementa la actividad de la enzima fosfatasa ácida cuando se emplea la fertilización nitrogenada en el cultivo de maíz. Por el contrario, al emplear fertilización nitrogenada en maíz bajo SD, la actividad de la fosfatasa ácida se reduce. Estos resultados son similares a los reportados por García y Rivero (2012), quienes encontraron diferencias significativas al evaluar el efecto de residuos de maíz en un Inceptisol proveniente del estado Portuguesa, en Venezuela, que estuvo bajo LC y SD sobre la fosfatasa ácida con valores de 592 y 641 $\mu\text{g p-NF g suelo}^{-1} \text{ h}^{-1}$, respectivamente.

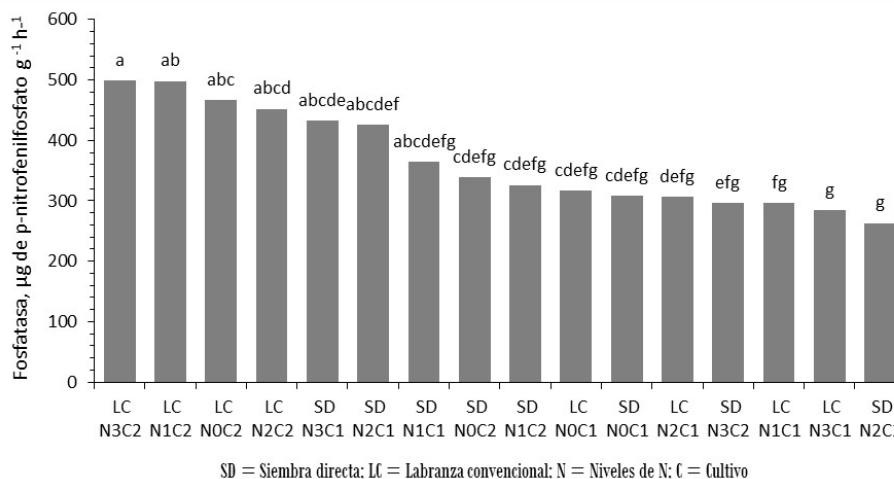


Figura 3. Variación en la actividad de la enzima fosfatasa, por efecto de la labranza, fertilización nitrogenada en los cultivos de fréjol y maíz sobre indicadores biológicos de la calidad de un suelo andino del Ecuador.

Figure 3. Variation in the activity of the phosphatase enzyme due to the effect of tillage, nitrogen fertilization in bean and corn crops on biological indicators of the quality of Andean soil in Ecuador.

Las condiciones creadas por la SD y acumulación de residuos de maíz generan mayor cantidad de sustrato para los microorganismos debido a la acumulación de MO a largo plazo. De igual forma, Heidari et al. (2016), en Irán, al estudiar el efecto de SD y LC, ambas con fertilización mineral en un Entisol bajo rotación (soya-maíz) obtuvieron promedios de 146 y 126 $\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$; respectivamente. Además, Toresani et al. (2009), al evaluar

labranza combinada (labranza mínima para trigo, labranza vertical en maíz y soja), obtuvieron 429 $\mu\text{g p-NF g}^{-1} \text{h}^{-1}$, en SD con fertilización doble 502 $\mu\text{g p-NF g}^{-1} \text{h}^{-1}$ y en SD con fertilización del agricultor 512 $\mu\text{g p-NF g}^{-1} \text{h}^{-1}$ sobre distintos suelos en rotación (trigo/maíz/soja/soja). La SD con y sin fertilización presentó mayor actividad de fosfatasa ácida en comparación con labranza mínima.

Los residuos dejados en superficie son importantes para promover la actividad de la enzima cuando se combina con SD debido a que se reduce la evaporación del suelo, manteniendo su humedad y temperatura, lo que permite la rápida descomposición de los residuos por macro, meso y microorganismos (Ferrerías et al., 2009; Utobo y Tewari, 2015).

3.4. Fluoresceína diacetato (FDA)

Se evidenció el efecto de la interacción NN*CC sobre la actividad de la enzima FDA (Figura 4). En el rango más alto se ubica N2C1 con una media de 164,7 $\mu\text{g de fluoresceína g}^{-1} \text{h}^{-1}$ y en el rango más bajo se ubica N0C1 con 74,7 $\mu\text{g de fluoresceína g}^{-1} \text{h}^{-1}$. Se puede inferir con estos resultados que la fertilización nitrogenada afectó la actividad de la FDA en el suelo bajo el cultivo de fréjol, sin embargo, cuando no se aplica N al suelo la actividad de la enzima se reduce drásticamente. La FDA es mayor en los suelos fertilizados ya que la aplicación de nutrientes favorece el crecimiento del cultivo que junto con la excreción de exudados del sistema radicular promueven la actividad de los microorganismos. Además, los residuos vegetales constituyen una fuente carbonada para la acción microbiana (Serri et al., 2018).

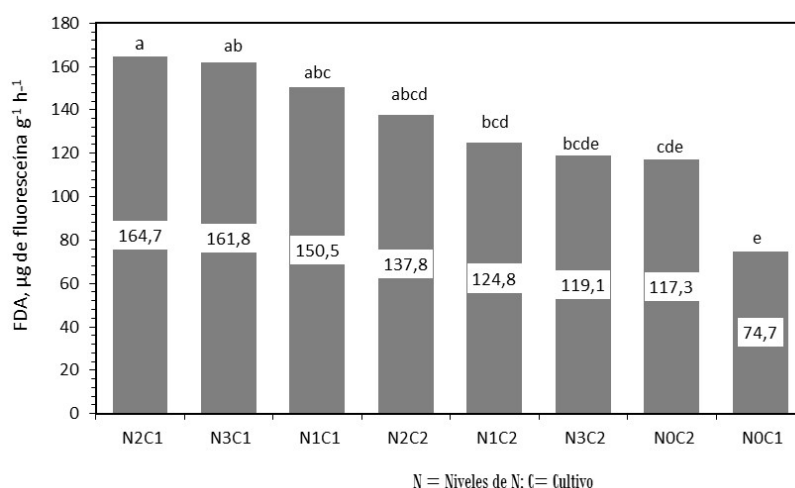


Figura 4. Variación en la actividad de la enzima FDA por efecto de la labranza, fertilización nitrogenada en los cultivos de fréjol y maíz sobre indicadores biológicos de la calidad de un suelo andino del Ecuador.

Figure 4. Variation in the activity of the FDA enzyme due to the effect of tillage, nitrogen fertilization in bean and corn crops on biological indicators of the quality of Andean soil in Ecuador.

En la localidad de Teodelina, provincia de Santa Fe, Conforto et al. (2010), al evaluar la actividad de la FDA en el cultivo de maíz bajo diferentes dosis y mezclas de fertilizantes químicos (diferentes dosis de N, P, S y micronutrientes), encontraron que el promedio de los tratamientos de NP, NPS y PS fueron estadísticamente superiores (2,0 $\mu\text{g fluoresceína g}^{-1} \text{h}^{-1}$) al testigo sin fertilización y a la fertilización solo con N y S (1,71 $\mu\text{g fluoresceína g}^{-1} \text{h}^{-1}$).

3.5. β -Glucosidasa

La actividad de la enzima β -G (Figura 5), presentó significancia estadística para la interacción de SL*NN*CC. Con estos resultados se puede inferir que la actividad de la enzima se ve favorecida bajo el cultivo de fréjol, siempre y cuando se utilice fertilización nitrogenada con LC. Por el contrario, bajo el cultivo de maíz y fréjol con SD y al utilizar fertilización nitrogenada, la actividad de la β -G se redujo. La dinámica de la actividad de la enzima β -G es al momento un indicador de la calidad del suelo muy estudiado por su rol en el ciclo del C,

particularmente por su participación en la degradación de la celulosa a su forma más simple, la glucosa (Lillo et al., 2011). En la literatura se reportan diversos valores de la actividad de β -G desde 31,9 a 208,1 $\mu\text{g p-NF g}^{-1} \text{h}^{-1}$ (Henríquez et al., 2014) y 69,5 a 850,7 $\mu\text{g p-NF g}^{-1} \text{h}^{-1}$ (Paz-Ferreiro et al., 2007), valores que están dentro del promedio de los encontrados en el presente estudio.

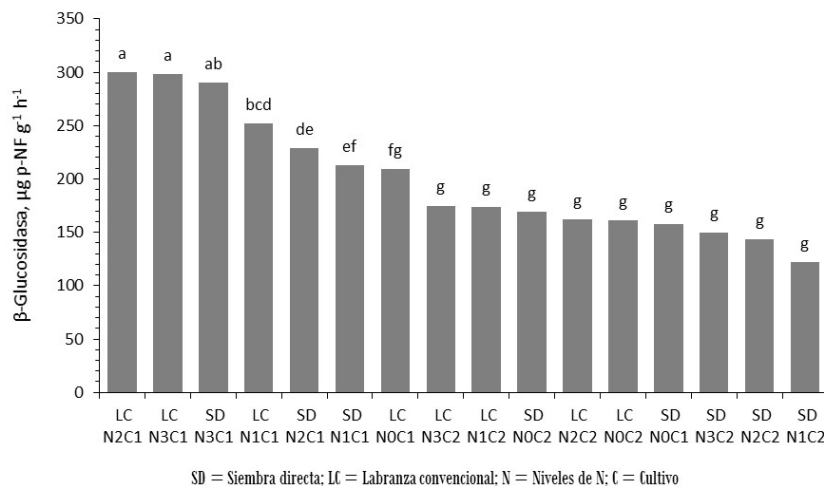


Figura 5. Variación en la actividad de la enzima β -glucosidasa por efecto de la labranza, fertilización nitrogenada en los cultivos de fréjol y maíz sobre indicadores biológicos de la calidad de un suelo andino del Ecuador.

Figure 5. Variation in the activity of the β -glucosidase enzyme due to the effect of tillage, nitrogen fertilization in bean and corn crops on biological indicators of the quality of Andean soil in Ecuador.

Diferentes sistemas de manejo del recurso suelo se han propuesto para evaluar la actividad de la enzima β -G. Así, Acosta-Martínez (2019), al evaluar la actividad de la β -G en un suelo de Minnesota bajo rotación (alfalfa-maíz-soya-trigo) y la típica práctica de siembra maíz-soya, encontró que la actividad de la enzima β -G bajo rotación fue mayor con 163 mg PNP kg^{-1} en comparación con la rotación maíz-soya con 120 mg PNP kg^{-1} .

Serri et al. (2018), al evaluar LC, labranza mínima y labranza mínima con aporte orgánico en uva (*Vitis vinifera* L.), determinó que el p-NF logrado con el manejo orgánico (sin aplicación de fertilizantes ni pesticidas) fue estadísticamente significativo con un promedio de 120 $\mu\text{mol p-NF g}^{-1} \text{h}^{-1}$ en comparación con la LC y la labranza mínima que presentaron valores de 72 y 66 $\mu\text{mol p-NF g}^{-1} \text{h}^{-1}$, respectivamente. Se considera que la aplicación de residuos orgánicos propios del cultivo es una fuente de C para el suelo y energía para los microorganismos.

Nevins et al. (2020) reportaron un incremento en la actividad enzimática cuando emplearon labranza mínima con la incorporación de residuos de cultivo de cobertera. La actividad de la enzima β -G se incrementó porque al emplear la labranza, el tamaño de los residuos disminuye y los incorpora en el suelo para que sean degradados rápidamente por los microorganismos. Además, los residuos de leguminosas incorporados al suelo se descomponen más rápido por su baja relación C:N, al contrario de lo que sucede con los residuos de maíz que al poseer una relación C:N alta y lignina en su composición química, requieren más tiempo para degradarse.

Ochoa et al. (2007) en su trabajo, reportaron que bajo SD se obtuvo mayor actividad de la β -G, en comparación con LC. Igual comportamiento se documentó en los ensayos realizados por Bandick y Dick (1999), quienes compararon tratamientos con N inorgánico (0 y 90 kg ha^{-1}), abono verde y estiércol. Al igual que en las investigaciones anteriores, el uso de enmiendas orgánicas y aplicaciones de N estimularon la actividad de la enzima β -G en contraste con el tratamiento sin aplicación de N. La enzima β -G es utilizada como indicador por ser sensible a los cambios en el manejo del suelo.

El análisis de correlación de Pearson $p < 0,05$ (Tabla 3) mostró que la BM presenta correlación positiva con la actividad de la enzima fosfatasa (0,50). Lillo et al. (2011) encontraron correlación positiva entre estas variables (0,66); explicándose que la mayor actividad de los microorganismos se debe a la cantidad de C disponible en el sustrato. En el sistema LC, incorporando N y bajo el cultivo de fréjol, existe mayor sustrato lábil para que los microorganismos mineralicen nutrientes con facilidad. La actividad de la enzima fosfatasa ácida presentó correlación positiva moderada con BM ($r = 0,50$). Farrus Miró (2016) determinó correlación entre la BM y fosfatasa (0,65) al evaluar diferentes abonos orgánicos y fertilización mineral en lechuga. Cabe indicar que la actividad de las enzimas depende de factores como: cantidad de BM presente en el suelo, pH, temperatura, humedad del suelo y cantidad y calidad de residuos orgánicos disponibles (Gabbarini et al., 2017).

Tabla 3. Matriz de correlación de Pearson para las variables biológicas, en el efecto de la labranza, fertilización nitrogenada en los cultivos de fréjol y maíz sobre indicadores biológicos de la calidad de un suelo andino del Ecuador.

Table 3. Pearson's correlation matrix for biological variables, on the effect of tillage, nitrogen fertilization in bean and corn crops on biological indicators of the quality of Andean soil in Ecuador.

VARIABLE	Biomasa microbiana	Respiración microbiana	Fosfatasa	FDA	β-Glucosidasa	Glomalina total
Biomasa microbiana	1,00					
Respiración microbiana	0,18 ^{ns}	1,00				
Fosfatasa	0,50*	-0,14 ^{ns}	1,00			
FDA	0,10 ^{ns}	-0,13 ^{ns}	0,24 ^{ns}	1,00		
β-Glucosidasa	0,24 ^{ns}	0,26 ^{ns}	-0,13 ^{ns}	0,60*	1,00	
Glomalina total	0,08 ^{ns}	-0,20 ^{ns}	-0,17 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,23 ^{ns}	1,00

ns = No significativo

* = Diferencia estadística significativa $p < 0,05$

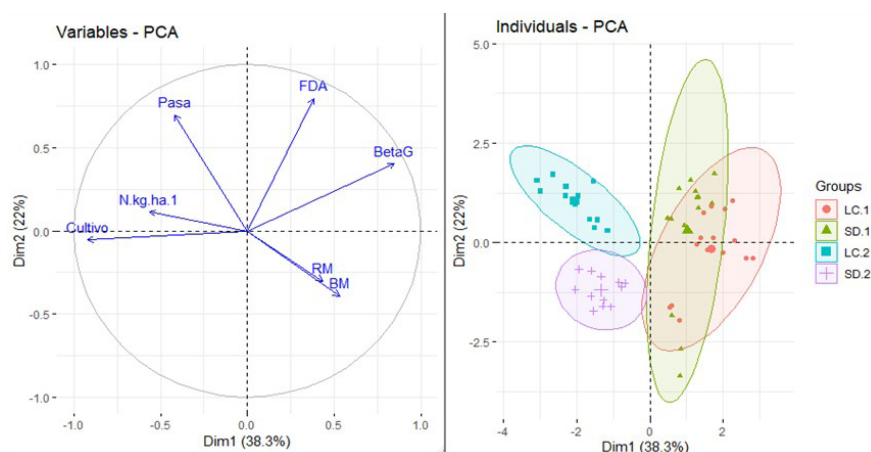
Adicionalmente, la FDA se correlacionó significativamente con la β-G (0,60). Alvear et al. (2007), al evaluar las propiedades bioquímicas como efecto de los residuos provenientes de dos plantaciones de *Pinus radiata*, determinaron correlación positiva entre FDA con β-G (0,63); además indicaron que la actividad de las enzimas depende de las condiciones climáticas y calidad de residuos, que contribuyen a la descomposición de la MOS. El N, producto de la fertilización nitrogenada sumado al N incorporado por *Rhizobium sp*, y la baja relación C:N de los residuos del cultivo de fréjol incrementan la descomposición de los residuos, que a su vez benefician a la dinámica de los nutrientes y energía para una mayor actividad enzimática en el suelo (Serri et al., 2017).

Asimismo, Alvear et al. (2005) encontraron correlación entre las enzimas β-G y FDA (0,88), indicando que las leguminosas proveen sustratos carbonados que son empleados para la nutrición y energía en los suelos. Los residuos son fácilmente degradables por los microorganismos; además, se incrementa su actividad, lo que conlleva a una mayor secreción de enzimas que participan en el ciclado de los nutrientes.

La influencia del manejo en cada variable evaluada se presenta en la Figura 6. La actividad de la enzima fosfatasa fue mejor en LCN3C2; la enzima FDA fue mayor en el C1 independientemente del SL empleado; sin embargo, fue mayor con la fertilización nitrogenada. Por su parte, la actividad de β-G fue mayor en LCC1 en los tratamientos donde se aplicó fertilización nitrogenada. La BM respondió al manejo bajo LC con el C1 al emplear el nivel óptimo de fertilización nitrogenada, contrastando con lo encontrado por Alhameid et al. (2019), quienes reportaron que el C de la BM es mayor bajo SD frente a LC, debido a que los residuos provenientes del cultivo anterior promueven la acumulación de MO en la capa superficial del suelo, por ende, mejora la retención de HS, lo que favorece la actividad de los microorganismos.

Figura 6. Análisis de componentes principales para estimar el agrupamiento de los indicadores de calidad del suelo por sistema de labranza y cultivo, en el efecto de la labranza, fertilización nitrogenada en los cultivos de fréjol y maíz sobre indicadores biológicos de la calidad de un suelo andino del Ecuador.

Figure 6. Principal component analysis to estimate the grouping of soil quality indicators by tillage system and crop, on the effect of tillage, nitrogen fertilization in bean and corn crops on biological indicators of the quality of an Andean soil in Ecuador.



La RM no presentó efecto del SL ni del CC, sin embargo, la RM fue mayor cuando no se empleó fertilización nitrogenada. La aplicación elevada de fertilizantes nitrogenados reduce la actividad de la RM, y también la reducción de las fuentes carbonadas contribuye al descenso de la RM (López, 2017).

Los SL, NN y CC influenciaron sobre la actividad de la fosfatasa ácida. La LC en el C2 con el nivel alto de N incrementa la actividad de fosfatasa en el suelo, pero el fenómeno contrario ocurre con la aplicación del tratamiento SDN2C2. Este comportamiento podría explicarse como el efecto de la LC que al voltear el suelo hace que los residuos entren en contacto con los microorganismos, los cuales lo degradan fácilmente. Sin embargo, diversas investigaciones (Gabbarini et al., 2017; Gálviz et al., 2007; García y Rivero, 2012; Heidari et al., 2016) determinaron el efecto contrario, es decir, bajo SD la actividad de la enzima es mayor en comparación con LC debido a que los residuos vegetales en superficie incrementan la actividad de la fosfatasa ácida.

Los SL no influyeron sobre la actividad de la FDA, sin embargo, en el C1 al emplear fertilización nitrogenada (N1, N2 y N3) existió mayor actividad en comparación al suelo sin aplicación de N.

La aplicación de los tratamientos de SL, NN y CC afectaron el contenido de β -G. El C1 bajo LC y el empleo de dosis óptima de N presentó mayor actividad de la β -G en comparación con la SDN1C2. Alhameid et al. (2019), en un experimento en un suelo sujeto a LC y SD durante 25 años, y con rotaciones de dos años bajo el cultivo de maíz y soya, determinaron que no hubo significancia estadística entre los tratamientos de labranza. Sin embargo, los mayores promedios de β -G se obtuvieron bajo el cultivo soya ($952,5 \mu\text{mol PNG kg}^{-1} \text{suelo h}^{-1}$) en comparación con el cultivo de maíz ($801 \mu\text{mol PNG kg}^{-1} \text{suelo h}^{-1}$), concluyendo que la calidad de los residuos, además de los factores abióticos como temperatura y HS, estimulan la actividad de las enzimas.

Los resultados de la presente investigación indican que CP1 y CP2 tienen la mayor porción de la varianza (60,3 %), los indicadores que conforman estos dos componentes (BM, RM, Fosfatasa ácida, FDA y β -G) son de fácil medición, sensibles al manejo; por lo tanto, pueden ser usados como indicadores de calidad del suelo bajo las condiciones edafoclimáticas evaluadas. De todos los indicadores biológicos planteados como aptos para medir la calidad de un suelo bajo SL, NN y CC; las variables biológicas evaluadas contribuyeron a explicar la variabilidad de los datos.

4. Conclusiones

Los factores en estudio tales como los sistemas de labranza, niveles de nitrógeno y cultivos de fréjol y maíz, inciden sobre algunos indicadores biológicos como la biomasa microbiana (BM), respiración microbiana (RM), fosfatasa ácida, fluoresceína-diacetato (FDA), y β -glucosidasa, considerándose como indicadores tempranos en la calidad de un suelo (ICS) agrícola, por su fácil medición. De acuerdo con el análisis de componentes principales (ACP), estos indicadores explican el 60,3 % de la varianza total y se consideran indicadores que reflejan la calidad del suelo.

La labranza convencional (LC) en la que se emplearon altos niveles de fertilización promovió el incremento de la actividad enzimática de β -glucosidasa y fosfatasa. Bajo LC y la aplicación de 100 % (N2) y 150 % (N3) de la fertilización nitrogenada cuando se empleó una leguminosa (fréjol), se pudo observar un incremento en la actividad enzimática de la β -glucosidasa. En contraste, con el sistema de siembra directa (SD), donde con todos los niveles de fertilización nitrogenada con el cultivo del cereal (maíz), se observó una clara disminución de la actividad de esta enzima en el suelo.

Por otro lado, bajo LC se pudo observar una mayor actividad de la enzima fosfatasa ácida, con el nivel de fertilización nitrogenada del 150 % (N3) durante el cultivo de maíz. Por el contrario, bajo este mismo sistema de labranza, en el cultivo de fréjol, con niveles bajo y alto de fertilización nitrogenada, hubo reducción de la actividad de esta enzima.

La aplicación de fertilización nitrogenada al 100 % (N2) después del cultivo de fréjol, promovió el incremento de la actividad enzimática de la FDA; en contraste, la no aplicación de fertilización nitrogenada en el cultivo de fréjol incidió negativamente, provocando la reducción de actividad de la FDA.

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento especial a los docentes investigadores de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la UCE que apoyaron esta investigación, al Ing. Marco Rivera e Ing. Concepción Sosa por su ayuda y colabora-

ción en el Laboratorio de Química Agrícola y Suelos (LQAS), así como a los estudiantes de Ciencias Agrícolas de la UCE: Marco Orellana, Katherine Pacheco y Dayana Cruz por su gran interés y participación en campo y laboratorio. Al Programa Doctoral de la Universidad de la Frontera de Chile por su apoyo en esta investigación.

Financiamiento

Esta tesis, contó con el financiamiento del Convenio Universidad Central del Ecuador-Universidad de la Frontera de Chile (UCE-UFRO) 2014-2019, como beca de investigación doctoral de M.E. Ávila-Salem y F. H. Montesdeoca, y con el apoyo de los fondos ANID/FONDECYT/1170264 y ANID/FONDAP/15130015 del Dr. P. Cornejo.

Contribuciones de los autores

- Leyda Llanga: investigación, metodología, curación de datos, software, análisis formal, redacción – borrador original y redacción – revisión y edición.
- María Eugenia Avila-Salem: conceptualización, investigación, metodología, validación, análisis formal, visualización, adquisición de fondos, recursos, administración del proyecto, supervisión, redacción – borrador original, redacción – revisión y edición.
- Fabián Montesdeoca: conceptualización, metodología, recursos, adquisición de fondos.
- Humberto Aponte: metodología.
- Lenin Ron-Garrido: curación de datos, software, análisis formal.
- José Espinosa: conceptualización, recursos.
- Marco Rivera: metodología.
- Fernando Borie: conceptualización, investigación, metodología, visualización, adquisición de fondos.
- Pablo Cornejo: conceptualización, investigación, metodología, visualización, adquisición de fondos.
- Soraya Alvarado Ochoa: conceptualización, investigación, metodología, validación, análisis formal, visualización, supervisión, administración del proyecto, redacción – revisión y edición.

Implicaciones éticas

Los autores declaran que no existen implicaciones éticas.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés financieros o no financieros que podrían haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

Referencias

- Acosta-Martínez, V., Pérez-Guzmán, L., y Johnson, J. M. F. (2019). Simultaneous determination of β -glucosidase, β -glucosaminidase, acid phosphomonoesterase, and arylsulfatase activities in a soil sample for a biogeochemical cycling index. *Applied Soil Ecology*, 142, 72-80. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.05.001>
- Alhameid, A., Singh, J., Sekaran, U., Kumar, S., y Singh, S. (2019). Soil biological health: influence of crop rotational diversity and tillage on soil microbial properties. *Soil Science Society of America Journal*, 83(5), 1431-1442. <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.03.0125>
- Alvarado Ochoa, S. P. (2008). Efecto de las prácticas de manejo del suelo en la captura y estabilización del carbono. En *Memorias del XI Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo "La Ciencia del Suelo y la Conservación Ambiental"* (pp. 1-16). Quito. <https://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/2519>

- Álvarez, M. F., Osterrieth, M. L., Bernava, V., y Montti, L. F. (2008). Estabilidad, morfología y rugosidad de agregados de Argiudoles típicos sometidos a distintos usos: su rol como indicadores de calidad física en suelos de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Ciencia del Suelo*, 26(2), 115-129. <http://www.suelos.org.ar/sitio/volumen-26-numero-2-diciembre-2008/>
- 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(2), 195-202. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.06.002>
- Alvear, M., Urra, C., Huaiquilao, R., Astorga, M., y Reyes, F. (2007). Actividades biológicas y estabilidad de agregados en un suelo del bosque templado chileno bajo dos etapas sucesionales y cambios estacionales. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 7(3), 38-50. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912007000300004>
- Ávila-Salem, M. E., Montesdeoca, F., Orellana, M., Pacheco, K., Alvarado, S., Becerra, N., Marín, C., Borie, F., Aguilera, P., y Cornejo, P. (2020). Soil biological properties and arbuscular mycorrhizal fungal communities of representative crops established in the Andean region from Ecuadorian highlands. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(4), 2156-2163. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00283-1>
- Bagnall, D. K., Rieke, E. L., Morgan, C. L., Liptzin, D. L., Cappellazzi, S. B., y Honeycutt, C. W. (2023). A minimum suite of soil health indicators for North America. *Soil Security*, 10, 100084. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2023.100084>
- Bandick, A., y Dick, R. (1999). Field management effects on soil enzyme activities. *Soil Biology and Biochemistry*, 31(11), 1471-1479. [https://doi.org/10.1016/s0038-0717\(99\)00051-6](https://doi.org/10.1016/s0038-0717(99)00051-6)
- Boada, R., y Espinosa, J. (2016). Factores que limitan el potencial de rendimiento del maíz de polinización abierta en campos de pequeños productores de la Sierra de Ecuador. *Siembra*, 3(1), 67-82. <https://doi.org/10.29166/siembra.v3i1.262>
- Bottomley, P. J. Scott Angle, J., y Weaver, R. W. (eds.). (2018). *Methods of Soil Analysis. Part 2. Microbiological and Biochemical Properties*. Soil Science Society of America. <https://www.wiley.com/en-us/Methods+of+Soil+Analysis%2C+Part+2%3A+Microbiological+and+Biochemical+Properties-p-9780891188650>
- Cantú, M. P., Becker, A., Bedano, J. C., y Schiavo, H. F. (2007). Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del suelo*, 25(2), 173-178. <http://www.suelos.org.ar/sitio/volumen-25-numero-2-diciembre-2007/>
- Castillo, N. E. T., Acosta, Y. A., Parra-Arroyo, L., Martínez-Prado, M. A., Rivas-Galindo, V. M., Iqbal, H. M., Bonaccorso, D., Melchor-Martínez, E. M., y Parra-Saldívar, R. (2022). Towards an eco-friendly coffee rust control: compilation of natural alternatives from a nutritional and antifungal perspective. *Plants*, 11(20), 2745. <https://doi.org/10.3390/plants11202745>
- Conforto, E., Fighi, G., Rovea, A., Boxler, M., Oddino, C., García, J., March, G., Meriles, J., y Vargas, S. (2010). Evaluación del efecto de la fertilización sobre las comunidades microbianas edáficas. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, (47), 1-3. <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2010/09/1.pdf>
- Dudek, M., Łabaz, B., Bednik, M., y Medyńska-Juraszek, A. (2022). Humic substances as indicator of degradation rate of chernozems in south-eastern Poland. *Agronomy*, 12(3), 733. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030733>
- Echeverría, H. E., y Sainz Rozas, H. R. (2001). Eficiencia de recuperación del nitrógeno aplicado al estadio de seis hojas del maíz bajo riego en siembra directa y labranza convencional. *Ciencia del suelo*, 19(1), 57-66. <http://www.suelos.org.ar/sitio/volumen-19-numero-1-junio-2001/>
- Farrus Miró, E. M. A. (2016). *Influencia de la fertilización sobre la actividad biológica del suelo. Estudio comparativo de diferentes fuentes de materia orgánica*. Universitat de les Illes Balears. <http://hdl.handle.net/11201/4474>
- Ferreras, L., Toresani, S., Bonel, B., Fernández, E., Bacigaluppo, S., Faggioli, V., y Beltrán, C. (2009). Parámetros químicos y biológicos como indicadores de calidad del suelo en diferentes manejos. *Ciencia del suelo*, 27(1), 103-114. <http://www.suelos.org.ar/sitio/volumen-27-numero-1-julio-2009/>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2015). *Especies de cultivo de cobertura comúnmente usadas*. <http://www.fao.org/ag/ca/es/2b.htm>
- Gabbarini, L. A., Frene, J. P., y Wall, L. G. (2017). Efecto de la rotación de cultivos en siembra directa sobre la actividad fosfatasa del suelo. *Ciencia del suelo*, 35(2), 229-238. <http://www.suelos.org.ar/publicaciones/v35n2-html/vol35-n2-html/v35n2a04.htm>
- Galantini, J. A., Iglesias, J. O., Maneiro, C., Santiago, L., y Kleine, C. (2006). Sistemas de labranza en el sudoeste bonaerense. Efectos de largo plazo sobre las fracciones orgánicas y el espacio poroso del suelo. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 35(1), 15-30. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86435102>

- Galantini, J. A., y Suñer, L. (2008). Las fracciones orgánicas del suelo: análisis en los suelos de la Argentina. *Agriscientia*, 25(1), 41-55. <https://doi.org/10.31047/1668.298x.v25.n1.2740>
- Gálviz, C., Burbano, H., y Bonilla Correa, C. R. (2007). Actividad de fosfatasa ácida en suelos cultivados con papa y praderas del corregimiento de Catambuco, Pasto-Colombia. *Acta Agronómica*, 56(1), 13-16. https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/563
- García, A., y Rivero, C. (2012). Efecto de residuos de maíz sobre la actividad enzimática con diferentes sistemas de labranza. *Venesuelos*, 20(1), 13-19. http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_venes/article/view/4566
- García, F. (2003). Balance de nutrientes en la rotación: Impacto en rendimientos y calidad de suelo. En *XI Congreso Nacional de AAPRESID*. Rosario. https://www.produccion-animal.com.ar/suelos_ganaderos/12-balance_nutrientes_en_la_rotacion.pdf
- Heidari, G., Mohammadi, K., y Sohrabi, Y. (2016). Responses of soil microbial biomass and enzyme activities to tillage and fertilization systems in soybean (*Glycine max* L.) production. *Frontiers in plant science*, 7, 1730. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01730>
- Henríquez, C., Uribe, L., Valenciano, A., y Nogales, R. (2014). Actividad enzimática del suelo deshidrogenasa, B-glucosidasa, fosfatasa y ureasa bajo diferentes cultivos. *Agronomía costarricense*, 38(1), 43-54. <https://doi.org/10.15517/rac.v38i1.15118>
- Jamioy Orozco, D. D., Menjivar Flores, J. C., y Rubiano Sanabria, Y. (2015). Chemical soil quality indicators in productive systems of Colombian Piedmont Eastern Plains. *Acta Agronómica*, 64(4), 302-307. <https://doi.org/10.15446/acag.v64n4.38731>
- Lillo, A., Ramírez, H., Reyes, F., Ojeda, N., y Alvear, M. (2011). Actividad biológica del suelo de bosque templado en un transecto altitudinal, Parque Nacional Conguillío (38° S), Chile. *Bosque*, 32(1), 46-56. <https://doi.org/10.4067/s0717-92002011000100006>
- López, F. M. (2017). *Dinámica de la cobertura de residuos en suelos bajo siembra directa: relación con la humedad del suelo y la transformación de las fracciones orgánicas lábiles*. Universidad Nacional del Sur. <http://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/3549>
- Ministerio del Ambiente. (2014). *Gestión integrada para la lucha contra la desertificación, degradación de la tierra y adaptación al cambio climático (GIDDACC)*. Dirección Nacional de Adaptación al Cambio Climático. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/07/GIDDACC.pdf>
- Montesdeoca, F., Ávila, M., Quishpe, J., Borie, F., Cornejo, P., Aguilera, P., Alvarado, S., y Espinosa, J. (2020). Early changes in the transition from conventional to no-tillage in a volcanic soil cultivated with beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*, 36(3), 181-189. <https://doi.org/10.29393/chjaas36-16ctfm80016>
- Moreno, C., González, M. I., y Egido, J. A. (2015). Influencia del manejo sobre la calidad del suelo. *Revista Científica Ecuatoriana*, 2(1). <https://revistaecuadorestabilidad.agrocalidad.gob.ec/revistaecuadorestabilidad/index.php/revista/article/view/8>
- Moreno, J., Alvarado, S., Ávila, M., y Montesdeoca, F. (2017). *Clasificación taxonómica de los lotes de SD del CADET. Reporte técnico*. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Central del Ecuador.
- Navas, M., Capa, M. B., y Masaguer, A. (2009). Evaluación de parámetros bioquímicos en un calcaric skeletal cambisol bajo diferentes usos de suelo. *Agronomía Tropical*, 59(2), 219-225. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5225222>
- Nevens, C. J., Lacey, C., y Armstrong, S. (2020). The synchrony of cover crop decomposition, enzyme activity, and nitrogen availability in a corn agroecosystem in the Midwest United States. *Soil and Tillage Research*, 197, 104518. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104518>
- Ochoa, V., Hinojosa, B., Gómez-Muñoz, B., y García-Ruiz, R. (2007). Actividades enzimáticas como indicadores de calidad del suelo en agroecosistemas ecológicos. *Iniciación a la Investigación*, (2), r1. <https://revistaselectronicas.ujaen.es/index.php/ininv/article/view/251>
- Paolini Gómez, J. E. (2010a). *Actividad B-glucosidasa (B-D-glucósido glucohidrolasa, E.C. 3.2.1.21)*. Laboratorio de Ecología de Suelos, Centro de Ecología, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC).
- Paolini Gómez, J. E. (2010b). *Medición de la actividad microbiana total usando diacetato de fluoresceína (Hidrólisis de DAF)*. Laboratorio de Ecología de Suelos, Centro de Ecología, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC).
- Paolini Gómez, J. E. (2016). *Método para determinar la actividad de la fosfomonoesterasa (fosfatasa ácida y alcalina) modificado por el Dr. Jorge E. Paolini*. Laboratorio de Ecología de Suelos, Centro de Ecología,

- Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC).
- Paz-Ferreiro, J., Trasar-Cepeda, C., Leirós, M. C., Seoane, S., y Gil-Sotres, F. (2007). Biochemical properties of acid soils under native grassland in a temperate humid zone. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 50(4), 537-548. <https://doi.org/10.1080/00288230709510321>
- R Core Team. (2019). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Ristow, A., Kirsten, K., y Fennell, L. (2017). Soil Respiration. En *Comprehensive Assessment of Soil Health – The Cornell Framework Manual*. Fact Sheet Number 16-10. https://bpb-us-e1.wpmucdn.com/blogs.cornell.edu/dist/7/9922/files/2021/11/10Soil_Respiration.pdf
- Rojas, J. M., Prause, J., Sanzano, G. A., Arce, O. E. A., y Sánchez, M. C. (2016). Soil quality indicators selection by mixed models and multivariate techniques in deforested areas for agricultural use in NW of Chaco, Argentina. *Soil and Tillage Research*, 155, 250-262. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.08.010>
- Schmidt, E. S., y Amiotti, N. M. (2017). Efecto de la secuencia de cultivos sobre las fracciones de materia orgánica y nitrógeno bajo siembra directa en la región pampeana semiárida sur. *Ciencia del Suelo*, 35(1), 95-103. <http://www.suelos.org.ar/publicaciones/v35n1-html/vol35-n1-html/v35n1a09.htm>
- Serri, D. L., Boccolini, M., Oberto, R., Chavarría, D., Bustos, N., Vettorello, C., Apezteguía, H., Miranda, J., Álvarez, C., Galarza, C., Chiófalo, S., Manrique, M., Sueldo, R., Fernández Belmonte, M. C., Mattalia, L., Cholaky, C., y Vargas Gil, S. (2018). Efecto de la agriculturización sobre la calidad biológica del suelo. *Ciencia del Suelo*, 36(2), 92-104. <http://www.suelos.org.ar/publicaciones/v36n2-html/vol36-n2-html/v36n2a09.htm>
- Serri, D. L., Faggioli, V. S., y Lorenzon, C. A. (2017). Fósforo del suelo: calidad del rastrojo y descomposición microbiana bajo diferentes contenidos hídricos. *Ciencia del Suelo*, 35(2), 239-248. <http://www.suelos.org.ar/publicaciones/v35n2-html/vol35-n2-html/v35n2a05.htm>
- Soria-Idrobo, N. (2008). Nutrición foliar y defensa natural. En *Memorias del XI Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo “La Ciencia del Suelo y la Conservación Ambiental”* Quito. <https://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/2519>
- Suquilanda, M. (2008). El deterioro de los suelos en el Ecuador y la producción agrícola. En *Memorias del XI Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo “La Ciencia del Suelo y la Conservación Ambiental”*. Quito.
- Terumi Sanomiya, L., Carlos Assis, L., Ademir de Oliveira, J., y Nahas, E. (2006). Mineralización de la paja de caña de azúcar en suelo adicionado con viñaza (subproducto de la industria del alcohol de caña de azúcar) y fertilizante nitrogenado. *Agricultura Técnica*, 66(1), 90-97. <https://doi.org/10.4067/s0365-28072006000100010>
- Toledo, D. M., Galantini, J. A., Ferreccio, E., Arzuaga, S., Giménez, L., y Vázquez, S. (2013). Indicadores e índices de calidad en suelos rojos bajo sistemas naturales y cultivados. *Ciencia del Suelo*, 31(2), 201-212. <http://www.suelos.org.ar/sitio/volumen-31-numero-2-diciembre-2013/>
- Toresani, S., Ferreras, L., Bonel, B., Bacigaluppo, S., Bodrero, M., Galarza, C., y Villar, J. (2009). Parámetros edáficos como indicadores de calidad de suelo en diferentes sistemas de manejo. *Para mejorar la producción*, (42), 83-89. https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-parametros_edaficos.pdf
- Utobo, E. B., y Tewari, L. (2015). Soil enzymes as bioindicators of soil ecosystem status. *Applied Ecology and Environmental Research*, 13(1), 147-169. https://doi.org/10.15666/aeer/1301_147169
- Vidal, I., Etchevers, J., y Fischer, A. (1997). Biomasa microbiana en un suelo sometido a diferentes manejos de labranza y rotación. *Agricultura Técnica*. 57(4), 272-281. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/28172>
- Zagal, E., y Córdova, C. (2005). Indicadores de calidad de la materia orgánica del suelo en un Andisol cultivado. *Agricultura Técnica*, 65(2), 186-197. <https://doi.org/10.4067/s0365-28072005000200008>
- Zhong, R., Zi, Z., Wang, P., Noor, H., Ren, A., Ren, Y., Sun, M., y Gao, Z. (2023). Effects of five consecutive years of fallow tillage on soil microbial community structure and winter wheat yield. *Agronomy*, 13(1), 224. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010224>